

Proyecto Fin de Carrera

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE TRANSMISIÓN AVANZADAS EN COMUNICACIONES MEDIANTE FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO

Autor

Alba Flor Dueñas

Director

Alicia López Lucía

Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)

Zaragoza, junio de 2015

EVALUACIÓN DE TÉCNICAS DE TRANSMISIÓN AVANZADAS EN COMUNICACIONES MEDIANTE FIBRA ÓPTICA DE PLÁSTICO

RESUMEN

Este proyecto está enmarcado en el campo de investigación de las fibras de plástico desarrollado por el Grupo de Tecnologías Fotónicas. Las fibras de plástico (POF, *Plastic Optical Fiber*) son ampliamente utilizadas gracias a sus características físicas que simplifican el proceso de instalación y mantenimiento y reducen los costes. Por el contrario, estas fibras presentan limitaciones en cuanto al ancho de banda y al balance de potencias. Es por esto, que están surgiendo numerosas líneas de investigación para estudiar estas problemáticas e intentar encontrar soluciones que hagan posible la introducción de la POF en nuevos ámbitos de aplicación.

Los objetivos de este proyecto han sido, en primer lugar, la integración del modelo en un software comercial que permite simular el comportamiento de un enlace POF a nivel de sistema sin que el usuario conozca las singularidades de los códigos internos que implementan el modelo. Esta integración ha sido posible gracias a las herramientas de co-simulación entre los softwares utilizados. Una vez realizada esta integración se ha pasado a realizar el segundo de los objetivos del proyecto, la realización de diversos estudios de dos técnicas de ecualización electrónica, la primera de ellas con un ecualizador DFE (*Decision Feedback Equalizer*) y la segunda con un FFE (*Feed Forward Equalizer*). A continuación se ha estudiado la técnica de precodificación Tomlinson-Harashima (THP, *Tomlinson-Harashima Precoding*).

En primer lugar se ha realizado el estudio de ecualización electrónica utilizando dos tipos de ecualizadores: el DFE y el FFE. Este estudio ha consistido en la realización de un conjunto de simulaciones en las que se han modificado dos parámetros principales, la longitud de la fibra y la tasa de transmisión, para ver el efecto que tienen ambos en el ancho de banda y en las limitaciones sufridas por la potencia. A continuación se ha evaluado el efecto del número de coeficientes de los ecualizadores y el número de conectores del enlace, así como el desalineamiento de los mismos. Los resultados muestran que existe un número de coeficientes óptimo que proporciona una calidad de transmisión adecuada con un coste de implementación admisible. Por otra parte, se ha estudiado la técnica THP. Se ha realizado el diseño de un precodificador no lineal en el transmisor y realizándose distintos experimentos para demostrar su validez y buen funcionamiento frente a condiciones adversas, como la interferencia intersimbólica del sistema. Para terminar se ha comparado esta técnica con la ecualización DFE de forma que ha sido posible cuantificar la mejora de prestaciones obtenida siendo el mejor método de los considerados el DFE, si bien en entornos de propagación de errores el método THP presumiblemente presenta mejor comportamiento. Por último, se ha realizado una serie de experimentos con un dispositivo comercial que implementa la precodificación anterior cuyos resultados se ajustan a los obtenidos mediante simulación en este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- Objetivo del proyecto	1
1.2.- Estructura de la memoria.....	2
Capítulo 2: CONCEPTOS GENERALES.....	4
2.1- La fibra óptica de plástico, POF.....	4
2.1.1- Características generales, ventajas e inconvenientes	4
2.1.2.- Fenómenos y parámetros	6
2.1.3.- Ámbitos de aplicación	7
2.1.4.- Modelo para la propagación de la luz en POF	8
2.2- Técnicas de transmisión avanzadas en enlaces POF.....	9
2.2.1.- Estado del arte	10
2.2.2- Técnicas de ecualización electrónica	11
2.2.3.- Técnica de precodificación Tomlinson-Harashima	13
Capítulo 3: ENTORNO DE SIMULACIÓN.....	16
3.1.- Introducción.....	16
3.2.- Características de OptSim	16
3.2.1.- Modos de simulación	17
3.2.2.- Tipos de señales	17
3.2.3.- Bloques de análisis y representación.....	17
3.2.4.- Otras características.....	18
3.3.- Bloques específicos utilizados.....	18
3.3.1.- Ecualización.....	18
3.3.2.- Bloques de co-simulación con Matlab (CCM)	20
Capítulo 4: ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE ECUALIZACIÓN Y RESULTADOS	25
4.1.- Aspectos generales y configuración.....	25
4.2.- Análisis de las técnicas de ecualización para un tramo de POF.....	27
4.2.1.- Estudio en función de la tasa de transmisión	27
4.2.2.- Estudio en función de longitud de la fibra	31
4.2.3.- Estudio de sensibilidad y conclusiones	33
4.2.4.- Introducción de códigos correctores de errores (FEC)	34
4.3.- Configuración de las técnicas de ecualización	36
4.4.- Estudio con conectores y desalineamientos.....	38
Capítulo 5: PRECODIFICACIÓN TOMLINSON-HARASHIMA.....	42

5.1.- THP para sistemas de comunicaciones modelados en tiempo continuo	42
5.2.- Diseño del sistema THP	43
5.3.- Resultados	44
5.3.1.- Variación del orden de la modulación M-PAM	44
5.3.2.- Comparativa entre las tasas de error de los métodos THP y DFE	47
5.4.- Ejemplo de aplicación	48
Capítulo 6: CONCLUSIONES	51
6.1.- Conclusiones	51
6.2.- Posibilidades de continuación	52
6.3.- Valoración del proyecto	52
Bibliografía	54
Anexo I: DIAGRAMA DE GANTT	57
Anexo II: MODELO MATRICIAL DE PROPAGACIÓN	58
Anexo III: FIBRA Y CONECTOR	61
III.1. Mitsubishi, GH-4001	62
III.2. Conector ST	64
Anexo IV: SOFTWARE UTILIZADO	65
IV.1.- OptSim	65
IV.1.1.- Ventana de simulación	65
IV.1.2.- Bloque utilizados en el proyecto	66
IV.2.- Matlab	69
IV.2.1.- Generación de matrices	70
IV.2.2.- Construcción del canal	70
IV.2.3.- Diseño del codificador y decodificador THP	70
Anexo V: EJEMPLO DE ARCHIVOS *.DTA Y *.DAT	71
V.1. Ejemplo de archivo *.DTA	72
V.2. Ejemplo de archivo *.DAT	73
Anexo VI: RESULTADOS DE ECUALIZACIÓN	74
VI.1.- Longitud de 10 metros	74
VI.2.- Longitud de 25 metros	75
VI.3.- Longitud de 75 metros	75
VI.4.- Longitud de 100 metros	76
VI.5.- Longitud de 200 metros	76
VI.6.- Longitud de 300 metros	77
VI.7.- Longitud de 400 metros	77

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 2.1.- Clasificación de las POFs según su perfil de índice. (a) Salto de índice, (b) gradiente de índice, (c) multi –salto de índice y (d) fibra de múltiples núcleos.....	5
Figura 2.2.- Cálculo de la distribución angular de potencia a la salida de un tramo de fibra (distancia z_2) a partir de la distribución angular a la entrada de la fibra (distancia z_1) y de la matriz de propagación de la fibra	9
Figura 2.3.- Diagrama de bloques del ecualizador DFE	12
Figura 2.4- Precodificador de Tomlinson-Harashima.....	14
Figura 2.5.- Descripción linealizada del precodificador de Tomlinson-Harashima.	14
Figura 2.6.- Diagrama de bloques del sistema	15
Figura 3.1.- Diagrama de bloques del ecualizador DFE modelado en OptSim.....	19
Figura 3.2.- Bloque DFE y su cuadro de diálogo en OptSim	20
Figura 3.3.- Icono del bloque CCM con su cuadro de parámetros sobre el esquemático	22
Figura 3.4.- Características del bloque CCM que representa un tramo de POF	23
Figura 3.5.- Características del bloque CCM que representa un conector	24
Figura 4.1.- Esquemático del sistema de comunicaciones.....	26
Tabla 4.1.- Valores por defecto y rango de valores de los parámetros utilizados en las simulaciones.....	27
Figura 4.2.- Representación del BER con una fibra de 50 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización	28
Figura 4.3.- Representación del BER con una fibra de 150 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.....	28
Figura 4.4.- Respuesta frecuencial del sistema POF: (a) sin normalizar respecto a las pérdidas del canal y (b) normalizada frente a las pérdidas del canal	29
Figura 4.5.- Diagramas de ojo con los efectos de: (a) la disminución del ancho de banda y (b) la disminución de la potencia recibida	30
Figura 4.6.- Representación del BER con una tasa de transmisión de 300 Mb/s, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.....	31
Figura 4.7.- Representación del BER con una tasa de transmisión de 1.25 Gb/s, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.....	32
Figura 4.8.- Producto ancho de banda-distancia	32

Figura 4.9.- (a) Variación del ancho de banda a 3 dB y (b) variación de la atenuación que sufre el sistema POF.....	33
Figura 4.10.- Sensibilidad para un BER de 10^{-6} con (a) ecualización DFE y (b) sin ecualización.	34
Figura 4.11.- Ganancia del código FEC	35
Figura 4.12.- Comparativa de BER con y sin FEC para una longitud de 25 metros: (a) para una tasa de transmisión de 100 Mb/s y (b) para una tasa de transmisión de 1 Gb/s.....	35
Figura 4.13.- Variación del BER en función de la longitud de la fibra y del número de coeficientes del ecualizador FFE para una tasa de transmisión de 500 Mb/s.....	36
Figura 4.14.- Variación del BER en función del número de coeficientes del ecualizador DFE....	37
Figura 4.15.- BER frente al número conectores: (a) con el DFE y (b) con el FFE	38
Figura 4.16.- (a) Ancho de banda a 3 dB y (b) atenuación de la respuesta frecuencial de la POF	39
Figura 4.17.- Comparación del BER en función de la tasa de transmisión, con desalineamiento y sin él, con ejes logarítmicos y utilizando un ecualizador DFE: (a) Desalineamiento axial, (b) desalineamiento longitudinal y (c) ambos desalineamientos, para dos tramos de 30 metros de POF unidos por un conector.....	40
Figura 4.18.- Respuestas frecuenciales normalizadas del sistema POF con y sin desalineamiento	40
Figura 5.1.- Diagrama de bloques del transmisor.	44
Figura 5.2.- Diagrama de bloques del canal.	44
Figura.5.3.- Diagrama de bloques del receptor	44
Figura 5.4.- Fragmento de las secuencias modulada (a) codificada (b) y decodificada (c) para una tasa de transmisión de 1 Gb/s y un valor de M igual a 2	45
Figura 5.5.- Fragmento de las secuencias modulada (a) codificada (b) y decodificada (c) para una tasa de transmisión de 1 Gb/s y un valor de M igual a 16	45
Figura 5.6.- Esquemático completo del sistema THP	46
Figura 5.7.- Señales en los puntos del esquemático mostrado en la Figura 5.6. A: Secuencia modulada, B: señal decodificada, C: señal a la salida del canal y D: secuencia decodificada	46
Figura 5.8.- Señal inicial y señal decodificada con ruido añadido.....	47
Figura 5.9.- Curvas de BER para los dos métodos estudiados. (a) DFE y (b) THP para 10, 25 y 50 metros y 1 Gb/s.....	48
Figura 5.10.- Esquemático del montaje experimental	49
Figura 5.11.- Montaje experimental	49
Figura 5.12.- Imagen de los transceptores utilizados	50
Figura I.1.- Diagrama de Gantt	57
Figura IV.1.- Pantalla principal del programa.....	65
Figura IV.2- Icono y bloque de parámetros del bloque PRBS.....	66

Figura IV.3.- Diagrama de bloques del modulador NRZ.....	67
Figura IV.4- Icono y bloque de parámetros del bloque NRZ	67
Figura IV.5- Icono y bloque de parámetros del bloque Filtro óptico	68
Figura IV.6.- Diagrama de bloques del receptor	68
Figura IV.7- Icono y bloque de parámetros del bloque Receptor	68
Figura IV.8- Icono y bloque de parámetros del bloque BER.....	69
Figura VI.1.- Representación del BER con una fibra de 10 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.....	74
Figura VI.2.- Representación del BER con una fibra de 25 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.....	75
Figura VI.3.- Representación del BER con una fibra de 75 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.....	75
Figura VI.4.- Representación del BER con una fibra de 100 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.....	76
Figura VI.5.- Representación del BER con una fibra de 200 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.....	76
Figura VI.6.- Representación del BER con una fibra de 300 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.....	77
Figura VI.7.- Representación del BER con una fibra de 400 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.....	77

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

AOC: *Active Optical Cable*

BER: *Bit Error Rate*

BERT: *Bit Error Rate Tester*

CAP: *Carrierless Amplitude Phase*

CCM: *Custom Component for Matlab*

CUNY: *City University of New York*

DARPA: *Defense Advanced Research Projects Agency*

DCF: *Dispersion Compensating Fiber*

DFE: *Decision Feedback Equalization*

DMT: *Discrete Multitone*

DSI-POF: *Double Step Index-POF*

EDS: *Effective Data Sequence*

EMD: *Equilibrium Modal Distribution*

EMI: *ElectroMagnetic Interference*

FEC: *Forward Error Correction*

FIR: *Finite Impulse Response*

FFE: *Feed-Forward Equalization)*

GI-POF: *Graded Index-POF*

GTF: *Grupo de Tecnologías Fotónicas*

HAN: *Home Area Network*

HDMI: *High-Definition Multimedia Interface*

IM-DD: *Intensity Modulation - Direct Detection*

IP: *Internet Protocol*

ISI: *Intersymbol Interference*

LED: *Light-Emitting Diode*

MC: *Multi Core-POF*

ML: *Maximun-Likelihood*

MLSE: *Maximum–Likelihood Sequence Estimation*

MMSE: *Minimum Mean Square Error*

MOST: *Media Oriented Systems Transport*)

MS: *Multi Step-POF*

MSI-POF: *Multi Step Index-POF*

NA: *Numerical Aperture*

NRZ: *Non-Return-to-Zero*

PAM: *Pulse Amplitude Modulation*

PF GI-POF: *Perfluorinated Graded Index-POF*

PMMA: *polimetilmetacrilato*

POF: *Plastic Optical Fiber*

QAM: *Quadrature Amplitude Modulation*

RF: *Radio Frequency*

SI-POF: *Step Index-POF*

SISO: *Single-Input and Single-Output*

SMF: *Single Mode Fiber*

THP: *Tomlinson-Harashima Precoding*

UTP: *Unshielded Twisted Pair*

ZF: *Zero-Forcing*

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Este proyecto fin de carrera se enmarca en la línea de investigación de fibras de plástico (POF, *Plastic Optical Fiber*) desarrollada dentro del Grupo de Tecnologías Fotónicas (GTF). El subgrupo de POF se ocupa tanto de la caracterización experimental de estas fibras y dispositivos relacionados con ellas, como del modelado de sus propiedades y diseño de aplicaciones para redes de corto alcance tales como redes domésticas o redes en medios de transporte.

1.1.- Objetivo del proyecto

La fibra óptica de plástico POF ha sido ampliamente usada en entornos de corto alcance y requerimientos de prestaciones moderados como es el caso de las redes en el automóvil, el hogar o los aviones. Respecto a esta última, la compañía Boeing tiene un importante papel en la investigación y desarrollo de nuevos sistemas para introducir este tipo de fibra en sus aviones; esta compañía colabora con el GTF en algunas de estas investigaciones, en el Capítulo 2 se ha realizado un resumen sobre ellas con los resultados obtenidos. Además de esta, también existe otra colaboración del grupo con la empresa KD-POF y la Universidad de la Ciudad de Nueva York (CUNY), un ejemplo de este trabajo se muestra en el Capítulo 5. Las características físicas de esta fibra son ventajosas en aspectos clave como coste de componentes asociados o de instalación y mantenimiento. Sin embargo, la POF presenta serias limitaciones en cuanto a balance de potencia y ancho de banda, lo que ha restringido su ámbito de aplicación. Recientemente ha crecido el interés por extender este ámbito, en particular se ha demostrado que introduciendo técnicas de transmisión avanzadas en enlaces POF es posible transmitir a tasas de Gb/s o incluso de decenas de Gb/s. Es por ello que dentro del mercado de componentes de POF están surgiendo líneas de desarrollo de transceptores que hacen uso de alguna de estas técnicas de transmisión avanzadas, si bien los transceptores comerciales actuales están basados en la técnica básica denominada IM-DD (*Intensity Modulation - Direct Detection*).

Este proyecto aborda la problemática del ancho de banda en comunicaciones mediante fibra óptica de plástico a nivel de simulación y en él se realiza un análisis en profundidad de varias técnicas de ecualización con el objetivo de paliar las limitaciones encontradas en enlaces de alta velocidad. Se ha realizado un estudio de los parámetros implicados y su influencia sobre las prestaciones. Las técnicas consideradas incluyen dos esquemas de ecualización en el receptor y una basada en precodificación en el extremo transmisor.

Es habitual realizar estudios de simulación a nivel de sistema de enlaces ópticos mediante plataformas software comerciales, como OptSim, OptiSystem o VPI Systems. Sin embargo, ninguno de ellos dispone de modelos para fibra óptica de plástico por la dificultad que entraña la descripción de la propagación de la luz a través de este tipo de fibra. Este problema de modelado ha sido tratado por parte del grupo GTF, que ha ideado y desarrollado un modelo para POF flexible y potente. La integración de este modelo en un entorno de simulación que permita obtener las prestaciones de calidad de la transmisión, como la tasa de error de bit o el diagrama de ojo, permitirá simular sistemas de comunicaciones completos basados en POF de

forma realista y supondrá una herramienta clave para el desarrollo de este proyecto y futuras investigaciones del grupo. En este proyecto se ha utilizado OptSim como plataforma software de simulación a nivel de sistema. La integración del modelo POF dentro de OptSim ha sido posible gracias a su herramienta de co-simulación con Matlab.

Por tanto, el proyecto se ha desarrollado a través de unas fases bien diferenciadas. En primer lugar se ha realizado un estudio bibliográfico de las técnicas de transmisión avanzadas candidatas para enlaces POF. A continuación se han diseñado los bloques OptSim asociados al modelo POF y se ha realizado un conjunto de estudios de ecualización tanto para un enlace con un único tramo de POF, como para enlaces con varios tramos de fibra unidos mediante conectores. Estos estudios se han realizado en función de diversos parámetros como la tasa de transmisión, la longitud del enlace, el número de coeficientes de los ecualizadores utilizados y la potencia óptica recibida. También se han diseñado los bloques necesarios para implementar la técnica de precodificación Tomlinson-Harashima (THP, *Tomlinson-Harashima Precoding*), para la cual no existe ningún modelo en OptSim y se han realizado varios estudios para comprobar sus prestaciones y las diferencias con el sistema de ecualización DFE. Por último, se han estudiado los resultados obtenidos y se han extraído las conclusiones de este trabajo.

En el siguiente apartado se realiza una breve descripción de los contenidos de esta memoria a partir de los capítulos que la conforman.

1.2.- Estructura de la memoria

Esta memoria está organizada de acuerdo a la siguiente estructura de capítulos:

- Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se explican los objetivos del proyecto y se describe la estructura de esta memoria junto con un resumen de cada capítulo.

- Capítulo 2: Conceptos generales

En este capítulo se explican las características de las fibras ópticas de plástico y sus ventajas e inconvenientes frente a otros medios de transmisión, así como sus ámbitos de aplicación. También se describe brevemente el modelo de fibra que se está utilizando y se repasa el estado del arte de técnicas de transmisión avanzadas aplicadas a enlaces POF. Finalmente, se presentan los fundamentos teóricos de las técnicas de transmisión seleccionadas en este trabajo entre las que se incluyen una técnica de precodificación y dos técnicas de ecualización electrónica.

- Capítulo 3: Entorno de simulación

En esta parte de la memoria se describe el software OptSim utilizado para la realización del proyecto. También se explica más detalladamente la creación de los denominados *bloques CCM*, que permiten integrar en el entorno de simulación tanto el modelo de la fibra creado por el GTF, como la implementación de las técnicas consideradas en este proyecto.

- Capítulo 4: Análisis de técnicas de ecualización y resultados

En este capítulo se ha realizado un análisis de varias técnicas de ecualización electrónica aplicada a sistemas POF. En concreto, se ha estudiado el efecto de las variaciones del ancho de banda y

de las pérdidas de potencia en el sistema para un conjunto de longitudes de fibra y de tasas de transmisión. A continuación, se ha estudiado el efecto del número de coeficientes de los ecualizadores utilizados. Y por último, también se ha estudiado el efecto de los conectores, con y sin desalineamiento, en las prestaciones del sistema.

- Capítulo 5: Precodificación Tomlinson-Harashima

En este capítulo se ha implementado un sistema basado en POF que hace uso de la técnica de precodificación Tomlinson-Harashima. Una vez comprobado el correcto funcionamiento del sistema bajo distintas condiciones, hemos comparado sus prestaciones con la mejor de las técnicas de ecualización evaluadas en el capítulo anterior. Además, incluye un experimento realizado con un dispositivo de la empresa KD-POF que implementa esta codificación.

- Capítulo 6: Conclusiones

En esta parte de la memoria se hace una recopilación de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores y se extraen una serie de conclusiones.

Así mismo, se incluyen un conjunto de anexos que pretenden aportar información complementaria y completar algunos de los aspectos tratados en la memoria.

- Anexo I : Diagrama de Gantt

Este documento recoge el un diagrama temporal de las actividades llevadas a cabo para la realización de este proyecto.

- Anexo II: Modelo matricial de propagación

En este anexo se explica el método seguido que ha permitido modelar sistemas con fibra de plástico de forma matricial para su posterior investigación en distintas herramientas de simulación.

- Anexo III: Fibra y conector

En este anexo se exponen las hojas de características de la fibra y del conector ST utilizados en las simulaciones para la construcción del canal.

- Anexo IV: Software utilizado

Este anexo recoge un resumen de las herramientas de simulación utilizadas, OptSim y Matlab, centrándose en los bloques utilizados y sus parámetros para la primera y en los diseños realizados para la segunda de ellas.

- Anexo V: Ejemplo de archivos *.dta y *.dat

Este documento contiene dos ejemplos de archivos *.dta y *.dat que permiten ver de forma gráfica las explicaciones dadas en el Capítulo 3.

- Anexo VI: Resultados ecualización

Este documento contiene las gráficas que muestran los resultados obtenidos de tasa de error para distintas longitudes de fibra y tasas de transmisión.

Capítulo 2: CONCEPTOS GENERALES

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos y el estado del arte de las técnicas consideradas en la realización de este proyecto. En primer lugar, se realiza una introducción a las fibras ópticas de plástico, a los fenómenos que en ellas se producen y a los parámetros con los que comúnmente se definen. A continuación, se describen alguno de los ámbitos donde la POF se aplica de forma exitosa, así como unas pinceladas básicas del modelo desarrollado en el grupo en que se enmarca el proyecto. Por último, se hace un repaso del estado del arte en cuanto a técnicas de transmisión avanzadas aplicadas a enlaces POF, explicándose seguidamente con más hincapié la parte teórica de las técnicas seleccionadas en este trabajo.

2.1- La fibra óptica de plástico, POF

En esta sección se realiza un repaso de las características generales de este tipo de fibras, así como los fenómenos y parámetros más representativos junto con las ventajas e inconvenientes de la POF frente a otros medios de transmisión. Para terminar se describen los ámbitos de aplicación más relevantes y se realiza una explicación del modelo matricial utilizado para describir la propagación de la luz a través de la fibra de plástico, a partir del cual se obtendrán las respuestas frecuenciales de los sistemas de comunicaciones considerados.

2.1.1- Características generales, ventajas e inconvenientes

Las Fibras Ópticas de Plástico (POF, *Plastic Optical Fiber*) son un tipo de fibra óptica formada por un material polímero tanto en el núcleo, como en la cubierta. El diámetro es mucho mayor que el de las fibras ópticas de sílice o vidrio convencionales, unas ocho veces mayor.

Existen diferentes tipos de POF de acuerdo a varios parámetros, siendo dos los parámetros principales a la hora de clasificar las fibras ópticas de plástico: el material del que están hechas y su geometría, principalmente el perfil de índice. El primer parámetro es determinante para la atenuación y la temperatura de operación de la fibra y el segundo para el ancho de banda.

Clasificando las fibras según su perfil de índice existen los siguientes tipos: las fibras de salto de índice (SI-POF, *Step Index-POF*), este grupo fue el primero que se fabricó en la década de 1960 y hoy en día sigue siendo el más utilizado debido a su menor coste y complejidad. El problema de estas fibras es el pequeño ancho de banda que tienen debido a la influencia de la dispersión modal, por este motivo se empezó a utilizar el siguiente tipo: las fibras de índice gradual (GI-POF, *Graded Index-POF*) cuyo producto ancho de banda-distancia es casi 100 veces mayor que el de las SI-POFs permitiendo trabajar por encima de 1 Gb/s frente a los 400 Mb/s con los que se trabajaba con el perfil de fibra anterior. Para seguir mejorando en términos de ancho de banda y atenuación se han ido utilizando otros perfiles más complejos que los anteriores y que debido a esta mayor complejidad suponen un aumento del coste. Las fibras con estos nuevos perfiles son: fibra de doble salto de índice (DSI-POF, *Double Step Index-POF*) y fibra de multi salto de índice (MSI-POF, *Multi Step Index-POF*), ambas se crearon para disminuir la apertura numérica

(NA, *Numerical Aperture*) mediante la atenuación de la potencia óptica que se propaga en ángulos elevados. Para mejorar más el ancho de banda se creó un tipo de fibra de índice gradual fabricada con materiales perfluorinados, la denominada PF GI-POF (*Perfluorinated Graded Index-POF*), con ella se ha logrado obtener la menor atenuación encontrada en POF, menos de 0.02 dB/km. Mientras que la atenuación habitual encontrada en las fibras SI-POF estándar fabricadas en PMMA (polimetilmetacrilato) es 10 veces mayor. Hay que tener en cuenta que estas atractivas características de la POF perfluorinada se alcanzan a expensas de perder alguna de las ventajas de las POF estándar, como facilidad de instalación o coste de sus componentes. Esto es debido a que este tipo de fibra presenta diámetros de núcleo hasta 10 veces inferiores a los de la SI-POF. Por último, otros tipos de fibra están siendo utilizados para seguir mejorando las prestaciones y manteniendo un diámetro del núcleo mayor que las anteriores. Es el caso de las fibras que se fabrican con perfiles de índice multi-salto (MS, *Multi Step-POF*), fibras con múltiples núcleos (MC, *Multi Core-POF*) o combinaciones de los anteriores [1]. En la Figura 2.1 pueden verse algunos de los perfiles de índice comentados en este apartado.

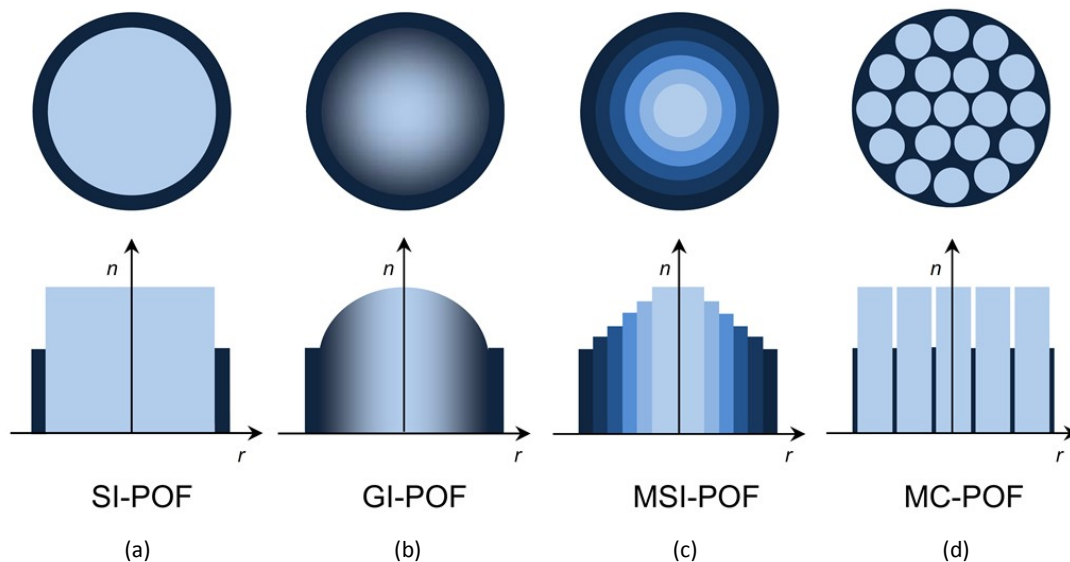


Figura 2.1.- Clasificación de las POFs según su perfil de índice. (a) Salto de índice, (b) gradiente de índice, (c) multi – salto de índice y (d) fibra de múltiples núcleos.

Debido a las especiales características físicas de la POF, los sistemas basados en fibra óptica de plástico presentan algunas ventajas y desventajas si se comparan con los sistemas basados en fibras ópticas de vidrio y con los basados en hilos de cobre [2]. Algunas de estas ventajas son las siguientes:

- Como cualquier otro sistema óptico, los sistemas con fibra de plástico son más robustos a las interferencias electromagnéticas (EMI, *ElectroMagnetic Interference*) que los sistemas basados en hilos de cobre; frente a estos sistemas también presentan ventajas en cuanto a la ligereza y a los transceptores utilizados ya que tienen un menor consumo.

Las siguientes ventajas se producen frente a las fibras de vidrio:

- Mayor flexibilidad y elasticidad a golpes, vibraciones y flexiones.
- Componentes más baratos y con menor complejidad.
- Los equipos utilizados para hacer análisis son más baratos y simples.

- Las conexiones entre tramos de fibra son más sencillas debido a su mayor diámetro.
- El rango de longitudes de onda de operación se encuentra en el visible por lo que existe mayor seguridad para el instalador.

Por el contrario, también existen algunas desventajas que se exponen a continuación:

- Las pérdidas son mayores.
- Presentan anchos de banda inferiores a los conseguidos por las fibras de vidrio.
- Al ser un campo menos estudiado, no existen normativas mundiales y hay menos información sobre la instalación y el diseño de sistemas.
- Hay menos producción lo que implica lograr menores descubrimientos y también un menor número de proveedores de equipos.

2.1.2.- Fenómenos y parámetros

Los dos fenómenos principales que tienen lugar en la fibra y que determinan las características de la propagación de la luz que la atraviesa son la atenuación y la dispersión. La **atenuación** (medida habitualmente en dB) da cuenta de las pérdidas de potencia incurridas en la fibra, mientras que la **dispersión** se refleja mediante el ensanchamiento temporal de los pulsos que se propagan en la fibra, lo que limita su capacidad. Estos fenómenos se describen comúnmente a través de sendos coeficientes por unidad de longitud siendo el valor de su magnitud proporcional a la longitud de la fibra en el caso de las fibras de vidrio. Sin embargo, dadas sus especiales características físicas, la fibra de plástico presenta un comportamiento distinto marcado por su alta multimodalidad. Así, el número de modos que son capaces de propagarse en una POF es del orden de millones, lo cual dificulta la caracterización de este tipo de fibras. Las propiedades de propagación de la fibra de plástico son fuertemente dependientes de la distribución de potencia entre los modos y no se estabilizan hasta que, transcurrida una cierta longitud, se alcanza la denominada distribución de equilibrio modal (*EMD, Equilibrium Modal Distribution*) [3]. Antes de que ocurra esta condición, tiene lugar una situación de transferencia de potencia entre los múltiples modos o acoplo modal, originada por perturbaciones como curvaturas o imperfecciones de la interfaz núcleo-cubierta.

Es por ello, que para describir las características de la propagación de la luz en la POF no basta con calcular, medir o estimar el valor de los coeficientes de atenuación y dispersión por unidad de longitud.

En general, se puede afirmar que cualquier condición que modifique la distribución modal de potencia en la fibra afectará a los fenómenos de atenuación y dispersión. Algunos factores importantes son los relacionados con la inyección de la luz en la POF, como las características espaciales de la fuente de luz. En cuanto a la fibra, un parámetro determinante es la **apertura numérica (NA)** que mide la capacidad de la fibra de aceptar potencia óptica en función del ángulo de inyección. Cuanto mayor sea el valor de NA, mayor cantidad de luz (luz inyectada en ángulos más grandes) podrá aceptar la fibra. Por el contrario, cuanto menor es la apertura numérica, menos modos se propagan por la fibra y por lo tanto la dispersión modal disminuye, esto hace que el ancho de banda también sea mayor. La apertura numérica típica de una POF es de 0.5, muy superior a la de las fibras de vidrio; también existen otras POFs con valores de NA menores lo que les permite alcanzar mayores velocidades de transmisión.

Finalmente, cabe destacar que habitualmente se trabaja con longitudes inferiores a la de equilibrio, lo que hace preciso considerar la evolución de la distribución modal a lo largo del enlace de fibra e incluir también el efecto de cualquier elemento del enlace que modifique esta distribución. Esta es la razón por la que se ha propuesto el modelo matricial para POF en el que se basa este proyecto [4], y lo que hace que los resultados de simulación alcanzados en él estén presumiblemente muy cercanos a los resultados experimentales que se pudieran obtener con un sistema real.

Además de la atenuación y la dispersión, un parámetro comúnmente usado para caracterizar la capacidad de los sistemas de comunicaciones ópticas y que considera de forma conjunta los efectos de la atenuación y la dispersión es el **producto ancho de banda-distancia**, expresado habitualmente en MHz·km. Algunos valores típicos para los distintos tipos de POF comentados anteriormente son los siguientes: para las fibras de perfil de salto de índice (SI-POF) es de aproximadamente 40 MHz·100 m [5] y para las primeras GI-POF de 38 MHz·100 m. Resultados posteriores con la fibra denominada Eska-Mega consiguieron aumentar este ancho de banda aproximadamente en un factor tres, hasta los 105 MHz·100m. Por último, la denominada fibra perfluorinada (PF-POF) presenta un producto ancho de banda distancia superior a 4 GHz·100 m [6].

2.1.3.- Ámbitos de aplicación

Tradicionalmente el ámbito de aplicación de las fibras de plástico ha estado enfocado a escenarios caracterizados por distancias cortas y requerimientos de ancho de banda moderados. En este tipo de entornos, la POF es un medio de transmisión muy idóneo que permite una sencilla instalación con un bajo coste. La tendencia seguida por los fabricantes de POF en los últimos años ha sido la de desarrollar nuevas fibras que permitan aumentar el limitado ancho de banda de este tipo de fibras. De esta forma, se ha extendido el ámbito de aplicación a escenarios con velocidades más altas y distancias más grandes. A pesar de ello, la fibra estándar SI-POF sigue siendo la más extendida, y los ámbitos de aplicación más populares, aquellos que implican alcances cortos. A continuación se describen algunos de los ámbitos de aplicación de las POFs que más auge han experimentado en los últimos años.

La industria de la POF tiene una importante aplicación en la **industria automotriz**. Daimler-Benz ha encabezado un grupo de fabricantes de automóviles y proveedores que ha desarrollado un estándar de bus de datos POF para los automóviles llamado MOST (*Media Oriented Systems Transport*) [7]. El objetivo es contar con una norma que todos los fabricantes de automóviles pueden comprar y, por lo tanto, aprovechar los beneficios de la producción en volumen. Los buses de datos iniciales funcionan a 28 Mb/s, pero se espera que aumente a 56 Mb/s y 155 Mb/s.

Las primeras **redes ópticas en aviones** estaban basadas en fibras de sílice o vidrio y funcionaron con alta fiabilidad, pero la necesidad de un cableado de alta resistencia y de bajo coste ha hecho que crezca el interés por la POF en este campo. Además de lo dicho anteriormente, existe otro factor importante para su éxito: el gran diámetro del núcleo y su alta apertura numérica hacen que las pérdidas de potencia debidas al desalineamiento en las uniones con conectores sean menores. A pesar de estas ventajas, la incorporación de estas fibras a los aviones aún no se está

llevando a cabo debido a los inconvenientes que presenta. Por ejemplo, debe diseñarse un cableado que sea resistente tanto al agua como al fuego y al calor, debe conseguirse un comportamiento estable para temperaturas de hasta 130 °C. También hay que tener en cuenta que el entorno de operación requiere de muy altas potencias para poder suministrar energía a tramos de hasta 100 metros y por tanto se necesitan unas infraestructuras adecuadas [8]. La empresa Boeing se está encargando de la investigación y desarrollo de estas infraestructuras que incluyen las fibras ópticas, el cableado y todo tipo de dispositivos requeridos en el montaje. Por último, existen otras investigaciones en Estados Unidos que están siendo financiadas por DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*).

Hoy en día, la distribución de señales en las **redes del hogar** (HAN, *Home Area Network*) se realiza mediante su transmisión por separado, en función de su naturaleza específica y de su formato; por ejemplo: señales RF (*Radio Frequency*) para la televisión o el HDMI (*High-Definition Multimedia Interface*) para la conexión entre dispositivos y los datos IP (*Internet Protocol*) para servicios *triple play*. Los enlaces se realizan mediante cableado o con redes inalámbricas. Respecto al cableado, cada aplicación utiliza un cable específico: los cables coaxiales para las señales RF, los cables AOC (*Active Optical Cable*) para los enlaces HDMI y los cables Ethernet para los datos IP. En cuanto a las conexiones inalámbricas, son más flexibles y convenientes para el usuario pero no se puede conseguir una cobertura total de la vivienda porque no se cumplen los requisitos de alta capacidad y de calidad de servicio (QoS) [1]. En este contexto, la introducción de las fibras ópticas de plástico ha permitido disponer en el hogar de un medio de transmisión común y válido para el transporte de las señales habituales en este entorno, con la ventaja añadida de facilidad de manipulación y bajo coste [9].

2.1.4.- Modelo para la propagación de la luz en POF

Para la realización de este proyecto se ha utilizado un modelo matemático desarrollado en el grupo de fibra óptica de plástico de la Universidad de Zaragoza en el que se ha enmarcado este trabajo. Este modelo describe la propagación de la luz a través de fibras POF de salto de índice fabricadas en PMMA y con núcleos de 1 mm de diámetro, que se caracterizan por su alta multimodalidad y un fuerte acoplo modal [4]. El modelo se deriva de la solución de la ecuación diferencial de flujo de potencia de Gloge, que se formula de forma matricial, lo que le otorga el nombre de modelo matricial para POF (se pueden encontrar más detalles en el Anexo II). El modelo matricial está basado en medidas experimentales de la distribución espacial de la luz a la salida de la fibra. En concreto, actualmente se dispone de modelos para cuatro tipos distintos de fibras ópticas de plástico comercializadas por distintos fabricantes (GH de Mitsubishi, HFB de Hewlett-Packard, PGU de Toray, así como una fibra proporcionada por la empresa Boeing y diseñada específicamente para su aplicación en aviones).

Así, en el contexto del modelo, cada tramo de fibra es representado mediante una matriz que contiene las características espaciales y temporales de dicho tramo de fibra. Esta matriz característica, denominada **matriz de propagación M** tiene tres dimensiones: dos relacionadas con las características espaciales (ángulos de entrada y salida) y la tercera relacionada con las características temporales (frecuencia). Esta matriz puede entenderse como un conjunto de matrices bidimensionales, una matriz por cada una de las frecuencias de la tercera dimensión. La gran potencia del modelo radica en su simplicidad, ya que permite obtener la distribución de

potencia angular a la salida del enlace de fibra $\mathbf{p}(z_2, \omega)$ a partir de la distribución de potencia angular a la entrada $\mathbf{p}(z_1, \omega)$ mediante un simple producto de matrices. Este proceso se presenta de forma esquemática en la Figura 2.2.

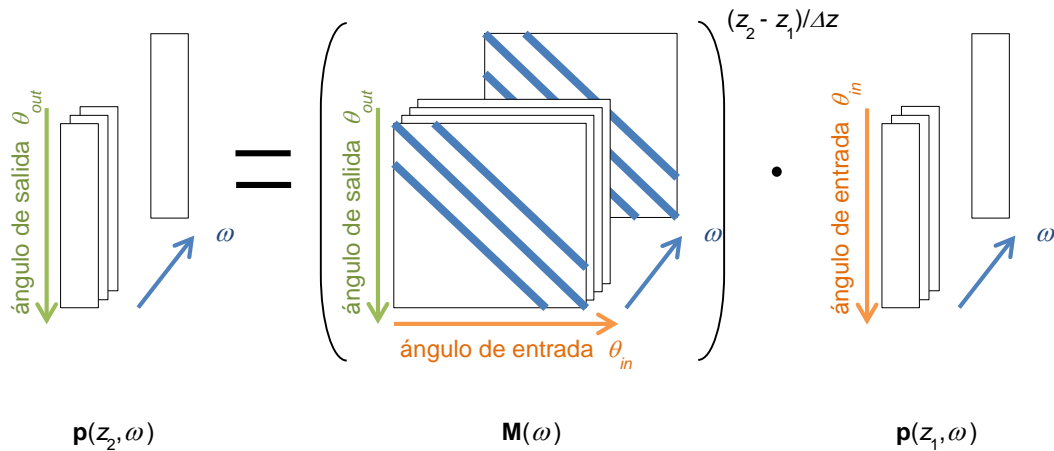


Figura 2.2.- Cálculo de la distribución angular de potencia a la salida de un tramo de fibra (distancia z_2) a partir de la distribución angular a la entrada de la fibra (distancia z_1) y de la matriz de propagación de la fibra.

En las simulaciones realizadas en este proyecto se ha utilizado el modelo para la fibra Mitsubishi GH-4001, cuya hoja de características se incluye en el Anexo III. Por otra parte, el modelo matricial también permite describir los efectos de otros componentes presentes en enlaces POF como conectores o curvaturas que, de forma análoga a la fibra, se caracterizan mediante matrices características.

La **integración** de este modelo en el software de simulación **OptSim** se ha realizado obteniendo la respuesta frecuencial equivalente del enlace POF a partir de la distribución angular de potencia a la salida del mismo. Esta respuesta frecuencial ha sido incluida en un bloque de esquemático OptSim de forma que es posible simular la transmisión a través del sistema óptico basado en fibra de plástico. Esta forma de simular el enlace POF a nivel de sistema es similar a la denominada metodología en dos pasos [10]. Sin embargo, en este proyecto se realiza la integración efectiva del modelo en un software comercial, de manera que no es necesario ejecutar de forma previa ningún código Matlab para obtener la respuesta frecuencial equivalente del enlace POF. En su lugar, se usan las herramientas de co-simulación con Matlab ofrecidas por OptSim. De esta forma el usuario final simplemente tiene que especificar los componentes y características del sistema POF y ejecutar la simulación resultando transparente para él los dos pasos internos de que consta la simulación.

2.2- Técnicas de transmisión avanzadas en enlaces POF

Esta sección está dividida en tres apartados: en el primero se hace un resumen del estado del arte de diversas técnicas de transmisión avanzadas utilizadas en POF, en el segundo se explican los fundamentos teóricos de la técnica de ecualización que se aplicará en la obtención de los resultados mostrados en el Capítulo 4 y en el último se exponen los fundamentos teóricos necesarios para entender la técnica de precodificación utilizada en el Capítulo 5. Se han elegido estas técnicas porque permiten mejorar las prestaciones de los sistemas de comunicación utilizados sin perder la simplicidad que proporciona el enlace POF, sólo introducen un pequeño

incremento de complejidad en el receptor, que es asumible con la tecnología electrónica disponible en la actualidad.

2.2.1.- Estado del arte

Tradicionalmente los sistemas de comunicaciones ópticas basados en POF han usado modulación en intensidad y detección directa. Sin embargo, en los últimos años ha crecido el interés por superar el límite de ancho de banda impuesto por la POF aplicando técnicas de transmisión avanzadas. En este apartado se ha hecho un recorrido por las distintas técnicas que se han propuesto para su aplicación en enlaces basados en fibra óptica de plástico.

Existen diferentes técnicas de **ecualización electrónica** que han sido estudiadas en el campo de la óptica, a continuación se detallan algunas de las propuestas y resultados presentes en la literatura.

En el documento [11] se muestra una comparativa, realizada mediante simulación y en función de la longitud de la fibra, de un sistema basado en un ecualizador FFE, (*Feed-Forward Equalization*) con otro que utiliza un MLSE (*Maximum-Likelihood Sequence Estimation*); los resultados muestran que el MLSE consigue el mejor rendimiento posible, por otra parte el FFE también logra obtener ganancias desde 1 hasta 3.4 dB para un BER de 10^{-5} y tasas de transmisión entre los 100 y los 500 Mb/s. También han sido realizadas otras pruebas como la mostrada en [12] en la que, para una fibra PMMA SI-POF con núcleo de 1 mm de diámetro y 50 metros de longitud, se observó que utilizando ecualización DFE (*Decision Feedback Equalization*) se consigue un buen equilibrio entre complejidad y rendimiento en transmisiones de Gigabit. Las mejores prestaciones alcanzadas introduciendo técnicas de ecualización indican que se puede trabajar con tasas de transmisión de 1.25 Gb/s en más de 75 metros de SI-POF de 1 mm de núcleo [13] y de 10.74 Gb/s en más de 35 metros de GI-POF de 1 mm de diámetro [14].

En cuanto a la técnica de **precodificación**, está siendo utilizada en sustitución de la técnica de ecualización DFE ya que diversos estudios demuestran la mejora existente en escenarios con propagación de errores. Así, en [15] y en [16] se consiguió, trabajando a una tasa de 3 Gb/s, obtener una ganancia de entre 1 y 2 dB en la relación señal a ruido utilizando el sistema THP junto al ecualizador FFE frente al caso de utilizar únicamente el ecualizador DFE.

Además de los estudios mencionados, la técnica de precodificación Tomlinson-Harashima ha sido investigada e incorporada en transceptores para POF comerciales por la empresa española KD-POF [17], que ha establecido un contrato de colaboración con la Universidad de la Ciudad de Nueva York y el grupo de POF de la Universidad de Zaragoza. En el Capítulo 5 de esta memoria se muestra un ejemplo de aplicación de esta técnica con dispositivos de la empresa mencionada.

Por último, hay que citar que también se ha propuesto la aplicación de otras técnicas de transmisión avanzadas en sistemas basados en POF. Una de ellas es la **modulación DMT** (*Discrete Multitone*), cuyo funcionamiento consiste en dividir el ancho de banda disponible en un gran número de subcanales. El intervalo de frecuencias disponible se divide en 256 portadoras moduladas según la modulación QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) y con un ancho de banda cada una de 4.3125 KHz. DMT puede asignar datos de manera que se maximiza el rendimiento de cada subcanal, si algunos subcanales no llevan ningún dato pueden apagarse

para optimizar el ancho de banda. DMT ha sido ampliamente utilizada en pruebas experimentales para alcanzar algunas de las mayores velocidades de transmisión de datos utilizando POF. Algunos de los mejores resultados obtenidos alcanzan una tasa de más de 10 Gb/s tanto para más de 50 metros de GI-POF de núcleo de 1 mm [18], como para más de 25 metros de SI-POF de núcleo de 1 mm [19].

Otra de las técnicas propuestas que mayor éxito se prevé tenga es la **modulación CAP** (*Carrierless Amplitude Phase*), basada en la modulación QAM. En concreto para generar la señal modulada CAP, la modulación QAM se realiza como combinación de dos señales PAM (*Pulse Amplitude Modulation*) filtradas a través de dos filtros diseñados para que sus respuestas impulsionales formen un par de Hilbert [20]. La modulación CAP representa una solución muy atractiva para los enlaces de corto alcance ya que emplea electrónica de baja complejidad, además de alcanzar una alta eficiencia espectral. Con esta técnica, se ha conseguido trabajar a 300 Mb/s en más de 50 metros de GI-POF de 1 mm de diámetro de núcleo usando fuentes ópticas de bajo coste [21]. Por último, se han realizado comparativas con otras técnicas, en el artículo [22] se logró, para una SI-POF de 1 mm de diámetro del núcleo con LEDs (*Light-Emitting Diode*) como fuentes ópticas, un mayor rendimiento de la modulación CAP-64 que el obtenido con NRZ (*Non-Return-to-Zero*). Estos resultados hacen de la modulación CAP una técnica competitiva en el futuro para los enlaces POF.

2.2.2- Técnicas de ecualización electrónica

La ecualización es la técnica usada en sistemas de comunicaciones por la cual es posible compensar la distorsión lineal introducida en la cadena de transmisión. En sistemas digitales, el principal efecto de esta distorsión es la aparición de dispersión, lo cual limita el ancho de banda del sistema de comunicaciones. En sistemas de comunicaciones ópticas tradicionales, basados en fibras de vidrio, la ecualización se ha realizado en el dominio óptico, mediante la introducción de tramos de una fibra especial, la conocida como fibra compensadora de la dispersión (DCF, *Dispersion Compensating Fiber*). La ecualización electrónica es una técnica que comúnmente se ha aplicado en los sistemas de transmisión no ópticos, si bien en los últimos años ha experimentado gran auge también en los sistemas basados en fibra óptica [1].

La ecualización puede realizarse tanto en el emisor como en el receptor; con la ecualización en ambas partes la señal se predistorsiona de tal forma que al final de la transmisión el efecto de la pre- y post-ecualización hace que la calidad de la señal mejore. Se debe elegir la técnica más adecuada teniendo en cuenta el compromiso entre complejidad y rendimiento del sistema. En la práctica, se consigue este equilibrio con el uso de filtros digitales de respuesta impulsional finita, también conocidos como filtros FIR (*Finite Impulse Response*) ubicados en el extremo receptor. El principal inconveniente es que el canal suele ser desconocido y variante con el tiempo lo que hace que sean necesarias técnicas adaptativas y de caracterización del canal que nos proporcionen mejores resultados.

Las diversas técnicas de ecualización se diferencian en la estructura del filtro utilizado y en los algoritmos que calculan los pesos en los algoritmos adaptativos. La ecualización basada en el método MLSE (*Maximun-Likelihood Sequence Estimation*) representa la técnica óptima para la detección de secuencias de datos con el criterio de máxima verosimilitud (ML, *Maximum-*

Likelihood), esta implementa el algoritmo de Viterbi para estimar la secuencia de información transmitida más probable. Esta técnica no es utilizada en este proyecto debido a su alta complejidad, que aumenta exponencialmente con el orden del canal y el tamaño del alfabeto de símbolos utilizado.

Para reducir la complejidad computacional que el MLSE supondría, se han elegido otros tipos de ecualización. Inicialmente se podría pensar en utilizar un ecualizador como el forzador de ceros (ZF, *Zero-Forcing*) pero éste puede hacer aumentar el ruido y degradar considerablemente los resultados. Por todo esto se ha decidido utilizar otro tipo de ecualizador lineal, el denominado MMSE (*Minimum Mean Square Error*) que se encarga de minimizar el error entre el símbolo transmitido y el recibido sin aumentar el ruido. Sin embargo, hay que tener en cuenta que si la interferencia intersimbólica o ISI (*Intersymbol Interference*) presente en el sistema es demasiado grande este ecualizador no será suficiente. En este proyecto este método ha sido utilizado para obtener mejores prestaciones en los distintos estudios realizados en el Capítulo 4 y para los dos tipos de ecualizador utilizados, DFE y FFE, y que son explicados en los siguientes apartados.

MMSE-DFE

El método de ecualización MMSE-DFE es diseñado para minimizar el error cuadrático medio. Éste utiliza las decisiones anteriores para intentar estimar el símbolo actual y eliminar cualquier posible rastro de ISI. El principal inconveniente de este ecualizador es la propagación de errores, es entonces cuando las prestaciones del método empeoran considerablemente. En la Figura 2.3 se muestra el diagrama de bloques del receptor [23]. La parte del receptor está formada por un filtro de realimentación hacia delante, $F(z)$, y otro filtro de realimentación $B(z)-1$.

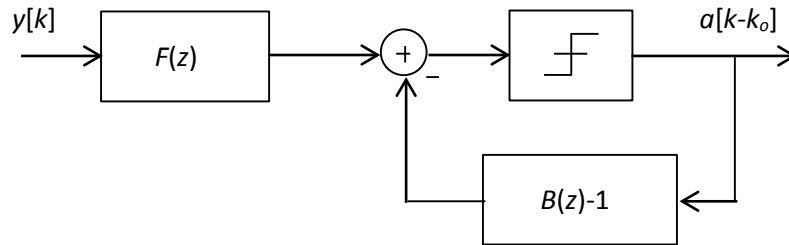


Figura 2.3.- Diagrama de bloques del ecualizador DFE.

Para longitudes finitas, se asume que el filtro de realimentación hacia delante es causal y FIR de orden q . La función de transferencia de este filtro es la siguiente:

$$F(z) = \sum_{k=0}^q f[k] \cdot z^{-k} \quad (2.1)$$

El filtro de realimentación $B(z)-1$ también es causal, FIR y de orden p . Su función de transferencia responde a la siguiente expresión:

$$B(z) = 1 + \sum_{k=1}^p b[k] \cdot z^{-k} \quad (2.2)$$

Se puede añadir un grado de libertad para minimizar el error cuadrático, un retardo k_o para obtener la estimación $\tilde{a}[k]$ de la secuencia de coeficientes transmitida $a[k]$. Entonces, la expresión del error sería la siguiente:

$$e[k] = \sum_{n=0}^q f[n] \cdot y[k-n] - \sum_{n=1}^p b[n] \cdot a[k-k_o-n] - a[k-k_o] \quad (2.3)$$

El objetivo de la optimización MMSE es determinar los coeficientes que forman los filtros $F(z)$ y $B(z)$ de tal manera que la varianza de la señal de error sea mínima:

$$E\{|e[k]|^2\} \longrightarrow \min \quad (2.4)$$

Las ecuaciones anteriores pueden expresarse de forma matricial, así la ecuación (2.3) quedaría:

$$e[k] = \mathbf{f}^H \mathbf{y}[k] - \mathbf{b}^H \mathbf{a}[k] - a[k-k_o] \quad (2.5)$$

Para obtener los coeficientes óptimos de los filtros bastará con derivar parcialmente la ecuación (2.4) en forma matricial respecto a los vectores \mathbf{f} y \mathbf{b} e igualar a cero ambas ecuaciones.

MMSE-FFE

El FFE es un ecualizador lineal cuya estructura es similar a la del ecualizador pero sin filtro de realimentación, $B(z)$. En este caso sólo es necesario optimizar los coeficientes de un filtro, el $F(z)$ anterior, por lo que el coste y la complejidad de realización disminuyen frente al anterior.

En este proyecto no es necesario el cálculo de estos coeficientes ni el diseño de los ecualizadores ya que la herramienta de simulación utilizada, que será explicada en el siguiente capítulo, ya dispone de bloques diseñados para realizar el proceso.

2.2.3.- Técnica de precodificación Tomlinson-Harashima

La precodificación de Tomlinson-Harashima fue ideada más o menos al mismo tiempo y de forma independiente a finales de la década de 1960 por Tomlinson en Reino Unido y por Harashima en Japón. Ambos lo aplicaron a un sistema SISO (*Single-Input and Single-Output*) para suprimir la ISI causada por la selectividad de frecuencia del canal. La idea básica de este método es realizar la ecualización en el transmisor, lo que hace que tengamos la secuencia de símbolos que se envía al canal codificada a partir de una secuencia de símbolos inicial. En la parte de decodificación se procede a decodificar esta secuencia enviada para obtener la secuencia creada inicialmente.

La precodificación de Tomlinson-Harashima es una técnica no lineal que tiene como base el uso de un bloque módulo $2M$, siendo M el orden de la modulación empleada. Esta técnica es especialmente destacada debido a su capacidad para eliminar la interferencia introducida en el transmisor, lo que permite poder trabajar a mayores tasas de transmisión que con otros sistemas lineales [24].

Para que esta técnica sea aplicable se debe cumplir una condición: el canal utilizado debe ser mónico, es decir, su primera muestra debe ser igual a la unidad ($h[0] = 1$), además de ser causal.

Inicialmente el precodificador de Tomlinson-Harashima fue diseñado para trabajar con modulaciones M-PAM. Para esta modulación el THP se puede entender como un filtro inverso a excepción de un bloque módulo $2M$ libre de *offset* usado en el transmisor, como se muestra en la Figura 2.4. Los valores de la señal a la salida de este bloque se encuentran en el rango $[-M, M)$, para ello si el valor a la entrada del bloque es superior a M , se le resta $2M$ hasta que el resultado sea menor que M ; también si el valor es menor que $-M$, se le suma $2M$ hasta tener un valor mayor o igual que $-M$.

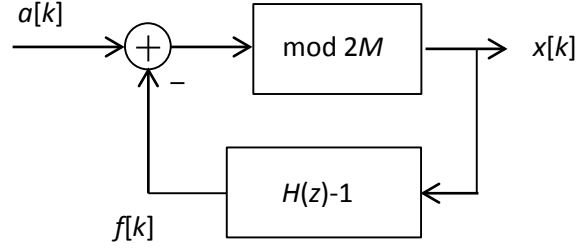


Figura 2.4- Precodificador de Tomlinson-Harashima.

El diseño mostrado en la Figura 2.4 se explica de forma lineal transformándolo en el diagrama mostrado en la Figura 2.5, donde el módulo se ha cambiado por la suma con una secuencia $d[k] \in 2M\mathbb{Z}$ a la se le denomina *secuencia de precodificación*. Esta secuencia se suma con la secuencia de datos inicial, $a[k]$, para formar la secuencia a la que denominamos secuencia efectiva de datos (EDS, *Effective Data Sequence*), $v[k]$.

$$v[k] = a[k] + d[k] \quad (2.6)$$

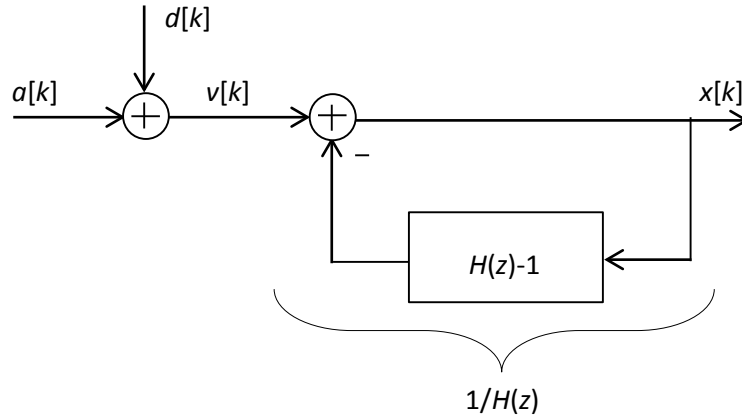


Figura 2.5.- Descripción linealizada del precodificador de Tomlinson-Harashima.

A continuación, la EDS pasa por el filtro del codificador para dar lugar a la secuencia $x[k]$ a partir de los valores de $d[k]$, lo cual se puede expresar de la siguiente manera:

$$x[k] = a[k] + d[k] - \sum_{n=1}^p h[n] \cdot x[k-n] = v[k] - f[k] \quad (2.7)$$

Lo siguiente es el paso por el canal y posteriormente la decodificación en el extremo receptor. El diagrama de bloques del sistema THP completo es el mostrado en la Figura 2.6.

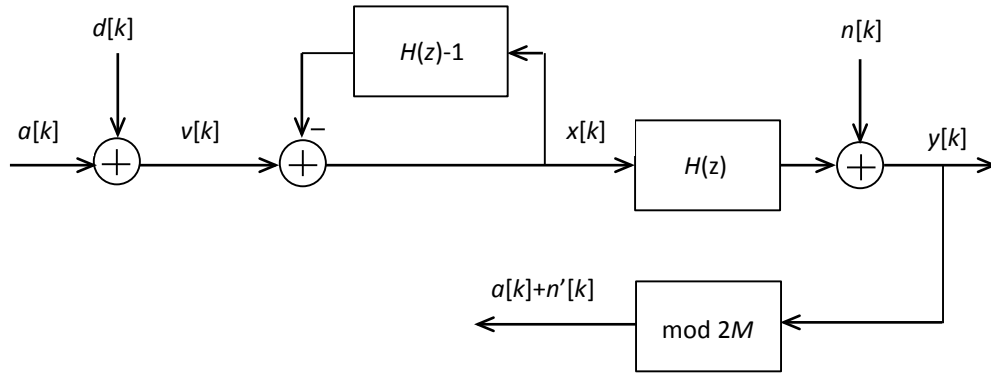


Figura 2.6.- Diagrama de bloques del sistema.

Además de la precodificación en el extremo transmisor, como se puede observar en el diagrama de bloques completo, se realiza el paso por el canal (2.8) y la decodificación en el extremo receptor, que consiste en un bloque módulo $2M$ que realiza la operación complementaria al bloque de la parte del codificador y permite recuperar la secuencia de símbolos original (2.9).

$$y[k] = x[k] * h[k] + n[k] = v[k] + n[k] \quad (2.8)$$

$$\text{mod } 2M(y[k]) = \text{mod } 2M(v[k] + n[k]) = a[k] + n'[k] \quad (2.9)$$

Por tanto, los procesos de codificación y decodificación están adaptados a la respuesta impulsional del canal y requieren una estimación de la misma. En el caso de sistemas en los que la respuesta del canal sea variante con el tiempo, será necesario compensar la pérdida de prestaciones por errores en la estimación de $h[k]$ mediante algún algoritmo adaptativo en el receptor [16].

Capítulo 3: ENTORNO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se presenta el entorno de simulación con el que se ha trabajado en este proyecto. OptSim es un software de simulación óptica comercializado por Rsoft Inc que permite simular el comportamiento de sistemas de comunicaciones a partir de bloques ya diseñados y de otros que el usuario puede diseñar en distintos lenguajes de programación. En la sección 3.2 se ha realizado un breve resumen de sus características principales, este resumen es ampliado en el Anexo IV, donde se explican más ampliamente las funciones utilizadas en la realización del proyecto.

3.1.- Introducción

La principal utilidad del software de simulación OptSim es el modelado de sistemas que están basados en fibras de vidrio monomodo (SMF, *Single Mode Fiber*), también incluye modelos de fibra multimodo, y en las últimas versiones se ha añadido una herramienta, llamada *ModeSYS*, que permite hacer modelado de sistemas basados en propagación de luz a través de estructuras. Básicamente OptSim permite analizar las señales ópticas y eléctricas que aparecen en distintos puntos de un sistema de comunicaciones mediante fibra. De esta forma, es posible obtener estas señales en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia, así como representar su diagrama de ojo u obtener la tasa de error de bit en recepción del sistema.

Algunas de las principales características de OptSim se resumen en las siguientes líneas [25]:

- Dos modos de trabajo: el “modo muestra” o *sample mode* y el “modo bloque” o *block mode*.
- Interfaz con Matlab que permite desarrollar modelos más personalizados con un código Matlab (archivo *.m). Además del interfaz con Matlab también permite desarrollar modelos con otros lenguajes de programación como por ejemplo en C y C++.
- Amplia biblioteca de componentes definidos por los fabricantes que permite modelar dispositivos que existen comercialmente.
- Tres tipos de señales: lógica, eléctrica y óptica.

3.2.- Características de OptSim

A continuación presentamos una descripción ampliada de algunas de las características generales de la herramienta utilizada.

3.2.1.- Modos de simulación

En el **modo bloque** se realizan simulaciones en las que las señales que se transfieren entre componentes lo hacen de forma completa y los tiempos y resultados simulados se representan en bloque. La principal ventaja de este modo de trabajo es que se trabaja más fácilmente con toda la señal y permite su conversión entre los dominios frecuencial y temporal según sea más conveniente. Por el contrario, en las simulaciones configuradas en **modo muestra** los datos que pasan entre los componentes representan una sola muestra, en cada paso de simulación las muestras pasan de un componente a otro. La ventaja de este modo de simulación es que se pueden utilizar secuencias con longitudes ilimitadas para tiempos de simulación también ilimitados.

En este proyecto se ha trabajado con el modo bloque porque nos permitía trabajar con Matlab utilizando los tres tipos de señales comentadas. Por el contrario, el modo muestra solo permite tener acceso a los bloques de co-simulación a las señales eléctricas y ópticas. Además, el modo bloque es más ágil y dispone de modelos apropiados para nuestros objetivos.

3.2.2.- Tipos de señales

Como ya se ha dicho en la sección 3.1 existen tres tipos de señales con las que trabajar: señales lógicas, eléctricas y ópticas.

Señales lógicas

Son las señales más simples con las que se puede trabajar en OptSim y contienen la información binaria además de alguna otra información auxiliar que describe la naturaleza de la señal. Se representan generalmente con una secuencia arbitraria de 0's y 1's.

Señales eléctricas

Las señales eléctricas representan voltajes y corrientes en el dominio eléctrico. Son descritas como funciones muestreadas en tiempo. Además, las señales eléctricas se caracterizan por el número de puntos, la tasa de muestreo, el instante temporal de inicio y un indicador o *flag* que indica cuándo la señal tiene que ser considerada como un voltaje o como una corriente.

Señales ópticas

Estas señales representan una amplitud de campo eléctrico para una pequeña ventana temporal. La principal información que especifica la señal óptica es un vector de números complejos acompañados de una frecuencia central y un tiempo de inicio que permite obtener o calcular retardos de la señal.

3.2.3.- Bloques de análisis y representación

OptSim tiene distintas opciones de representación o visualización de resultados, numérica y gráfica. Todos los bloques de representación tienen la posibilidad de mostrar los resultados de forma numérica en un archivo de texto para su posterior formateo y representación y de forma gráfica en un archivo *.win que sólo puede abrirse desde la aplicación de representación desarrollada por la misma compañía que OptSim. Dentro del grupo de bloques que devuelven

resultados existen los que permiten obtener los valores de potencia óptica y/o eléctrica, en escala lineal o logarítmica, en cualquier punto del sistema, otros como el analizador de BERT (*Bit Error Rate Tester*) de especial utilidad en el análisis de prestaciones de sistemas de comunicaciones y otros de representación gráfica como el denominado *Multiplot*, que permite la visualización de cinco representaciones distintas de la señal, entre ellas en tiempo y frecuencia, así como su diagrama de ojo.

3.2.4.- Otras características

Muchos de los bloques incluidos en OptSim permiten al usuario utilizar sus propios datos en el modelado. Por ejemplo, es posible utilizar una función de transferencia diseñada previamente, en lugar de las que ya están definidas en el propio programa, introduciendo los valores numéricos en un archivo *.txt o *.dat y cargando este archivo en el bloque correspondiente. También es posible cargar una secuencia binaria en lugar de que el bloque encargado de ello en OptSim genere una aleatoriamente.

Esta característica la tiene el bloque denominado *Optical Filter*, que se explicará con más detalle en el Anexo IV que recoge las características del software utilizado. Este bloque ha sido fundamental para el desarrollo del proyecto ya que gracias a esta característica se ha podido incorporar la respuesta frecuencial del enlace POF, obtenida mediante el modelo del grupo, a los bloques ya definidos en el software. Uno de los parámetros de este bloque es el que define el tipo de filtro que se va a utilizar, en este caso hay que elegir el tipo de nombre *Custom1*, entonces queda habilitado otro de los parámetros que nos permite seleccionar el archivo en el que están guardados los valores por los que está formada la respuesta frecuencial del canal. En el apartado 3.3.2 se explica un tipo de bloques especiales gracias a los cuales puede calcularse la respuesta frecuencial utilizada por este *Optical Filter*.

3.3.- Bloques específicos utilizados

Esta sección está dividida en dos apartados. En el primero se explican los bloques del software que permiten realizar la ecualización y en el segundo se explican los bloques de co-simulación con Matlab (*Custom Component for Matlab*) [26].

3.3.1.- Ecualización

OptSim cuenta con varios bloques para realizar funciones de ecualización electrónica. Se encuentran dentro de su librería de bloques llamada *All Models*, en la sublibrería de los modelos en modo bloque, *Block-Mode Models*, en el apartado de bloques eléctricos, *Electrical Modules*.

- El **bloque FFE** consiste en una estructura de filtro formada únicamente por elementos de propagación hacia adelante o *feed-forward* que el usuario puede modificar. El bloque modela una estructura de un filtro FIR estando los valores de los coeficientes definidos por el usuario. Realiza la siguiente transformación de la señal de entrada:

$$y(t) = \sum_{i=-N}^N C_i \cdot x(t - i\Delta T) \quad (3.1)$$

Donde C_i es el valor de los coeficientes y ΔT se define como el retraso de los coeficientes en función del período de bit T_B de la siguiente forma:

$$\Delta T = \frac{T_B}{2^{taps_delay}} \quad (3.2)$$

donde *taps_delay* es el retraso en muestras de los coeficientes del ecualizador.

El bloque encargado de realizar la ecualización FFE permite al usuario elegir el número de coeficientes que formarán la respuesta del ecualizador, los valores que estos tendrán y su retardo. Este bloque presenta la desventaja de no poder introducir ningún tipo de optimización en el cálculo de los valores de los coeficientes. Es por este motivo que se ha utilizado el bloque que se explica a continuación para realizar todos los análisis del Capítulo 4 de este proyecto.

- El **bloque DFE** consiste en una estructura FIR formada por elementos de propagación hacia adelante (en adelante *feed-forward*) y por elementos de retroalimentación (en adelante *feed-back*). En este tipo de ecualizador se utiliza la información de las decisiones anteriores para mejorar el efecto de la ecualización. Los valores de los coeficientes pueden calcularse a partir de la optimización MMSE o sin ella. En el Capítulo 4 se explicará con más detalle las características elegidas en los experimentos.

En las Figuras 3.1 y 3.2 se muestran el diagrama de bloques que modela el funcionamiento del ecualizador en OptSim y el aspecto del bloque con su cuadro de parámetros, respectivamente.

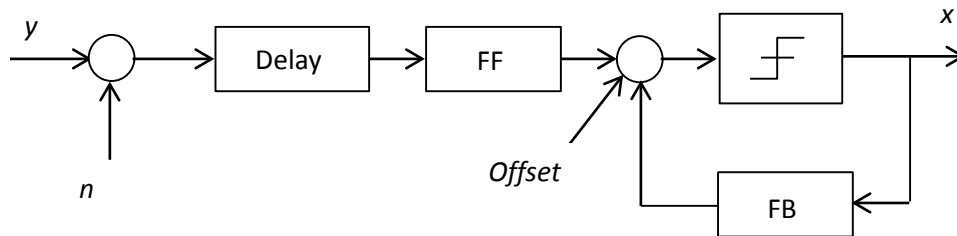


Figura 3.1.- Diagrama de bloques del ecualizador DFE modelado en OptSim.

En este bloque, al igual que en el FFE, el usuario puede introducir el número de coeficientes o *taps*, en este caso en sus variantes *feed-forward* y *feed-back*, y sus valores pero la gran diferencia, por la cual este bloque es el utilizado para obtener todos los resultados, es que existe la opción de aplicar la optimización MMSE. De este modo, hemos podido introducir en nuestro sistema ecualizadores DFE así como ecualizadores FFE, para los cuales ha bastado con poner a cero el parámetro que define el número de coeficientes *feed-back* del bloque.

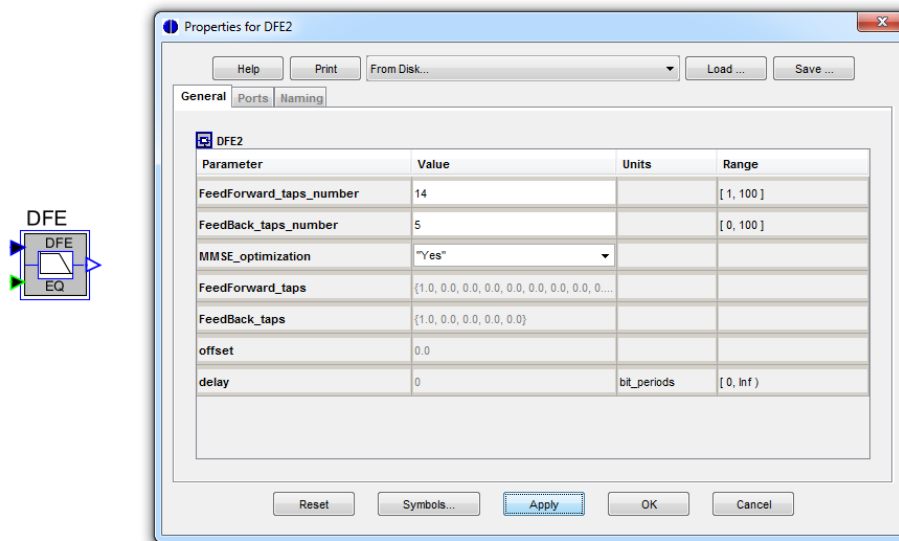


Figura 3.2.- Bloque DFE y su cuadro de diálogo en OptSim.

3.3.2.- Bloques de co-simulación con Matlab (CCM)

Además de los bloques que permiten que el usuario introduzca sus propios datos, en OptSim también existe la posibilidad de crear bloques nuevos completamente diseñados por el usuario. Es el caso de los bloques de co-simulación con Matlab que se presentan en este apartado.

Creación de los bloques

Los bloques CCM (*Custom Component for Matlab*) permiten simular en OptSim modelos creados en archivos *.m de Matlab.

Para crear uno de estos bloques hay que seguir los siguientes pasos:

1. Escribir el modelo deseado en un archivo *.m de Matlab.
2. Crear un archivo *.dta con la definición de los parámetros del modelo.
3. Generación del bloque CCM.

La creación de estos bloques varía en función del modo de trabajo en el que se esté operando. En esta memoria se explican los pasos que hay que seguir si se trabaja en el modo bloque, que nos permite operar con los tres tipos de señales descritas anteriormente.

1. Escritura del modelo en un archivo *.m de Matlab.

En primer lugar hay que escribir el modelo deseado en un archivo *.m de Matlab, el lenguaje utilizado debe ser el mismo que se utilizaría si se quisiese ejecutar en Matlab. Es posible utilizar parámetros en el código sin inicializar y que sea el usuario que vaya a ejecutar el programa desde OptSim el que les dé el valor; para ello, en el código se utiliza la variable como si ya estuviera hecha la inicialización y luego, cuando se cree el archivo *.dta debe haber un campo en el que se defina ese parámetro con el mismo nombre que se ha utilizado en el archivo de Matlab.

Si se necesitan utilizar las variables que entran al bloque y/o modificar las que salen hay que tener en cuenta cómo es la estructura de datos con la que se trabaja en OptSim.

Los tres tipos de datos están almacenados en estructuras de tipo *struct* muy similares. El nombre de la estructura siempre es OutNode o InNode dependiendo si la señal es de salida o de entrada al bloque. Dentro de ella aparecen parámetros que definen el tipo y las características de la señal y que si se desea se pueden almacenar en un archivo *.dat para su posterior utilización y análisis. A continuación se listan y se describen brevemente estos parámetros:

- Tipo de señal: se define con los valores 1, 2 o 3 si son señales ópticas, eléctricas o binarias respectivamente.
- Ruido: existe una variable que indica si la señal está acompañada de ruido y hay también una estructura que almacena su tamaño y su magnitud.
- Señal: este último parámetro está definido como otra estructura que contiene todas las características de la señal. Los parámetros que almacena son:
 - Longitud.
 - Valores numéricos.
 - Tasa de transmisión
 - Longitud del patrón de bits
 - Longitud de onda

Para que al ejecutarse el diseño no se produzca ningún error, el archivo *.m debe guardarse en el mismo directorio en el que esté el proyecto creado en OptSim.

2. Creación del archivo *.dta.

En el archivo *.dta se definen y describen todos los parámetros que aparecerán en el bloque CCM en OptSim. La interfaz de co-simulación OptSim-Matlab crea las variables en el entorno de Matlab con los mismos identificadores definidos por el usuario en este archivo.

Se pueden definir los parámetros que se quiera que el usuario pueda modificar en OptSim antes de la ejecución pero existe un conjunto cuya definición es obligatoria. Estos últimos no están relacionados con el modelo realizado en el archivo *.m de Matlab sino con las características del bloque. Nos referimos a los parámetros encargados de definir el número de entradas y salidas y el tipo de cada una de ellas. Los tipos de señales que pueden entrar y salir de un bloque CCM son los tres tipos mencionados en la sección anterior: lógica, eléctrica y óptica, y la forma de definirlos en el archivo *.dta es la siguiente:

INSIGTYPES ElecSigType OpSigType BinSigType

Otros parámetros obligatorios son el nombre que se le quiera dar al bloque y la abreviatura que aparecerá en el esquemático; también hay que definir la versión de Matlab que se va a utilizar.

En el Anexo V se muestra un ejemplo de un archivo *.dta utilizado en el proyecto: puede observarse que las primeras líneas corresponden a los parámetros de obligada definición y el resto, los que empiezan con la palabra *PARAM*, son los que el usuario necesita para su modelo.

3. Generación del bloque CCM.

Una vez la definición de los parámetros del modelo está terminada, ya se puede introducir el bloque CCM en el esquemático, para ello se busca en la librería correspondiente y se traslada al esquema, entonces se hace doble click sobre él y se carga el archivo *.dta correspondiente. Una vez terminado el proceso tendríamos algo parecido a lo que se muestra en la Figura 3.3.

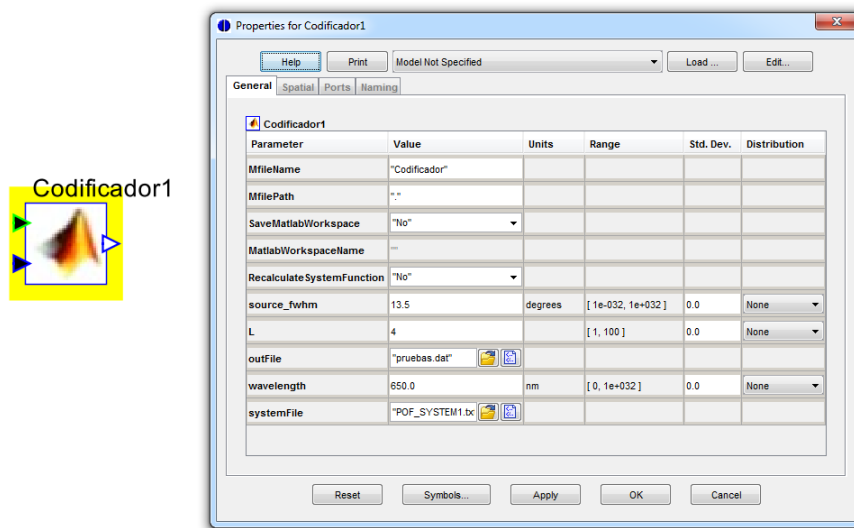


Figura 3.3.- Icono del bloque CCM con su cuadro de parámetros sobre el esquemático.

Ahora ya puede unirse el bloque a los bloques correspondientes en el sistema completo y ejecutarlo.

Si se desean ver los resultados que se han producido en el bloque hay distintas opciones: si sólo se desean ver las salidas se utilizan los mecanismos de visualización descritos en el apartado 3.2.3 del capítulo, pero si se quieren ver los resultados producidos dentro del bloque, en el archivo *.m debe guardarse el espacio de trabajo. Esto puede realizarse de dos formas: guardar directamente en el código Matlab con el comando `save` o añadiendo en el archivo *.dta los siguientes parámetros:

```
PARAM SaveMatlabWorkspace EnumType
GROUP General
VALUE No
FIELD No Yes
ENDPARAM
```

```
PARAM MatlabWorkspaceName StringType
GROUP General
REQUIRES SaveMatlabWorkspace:Yes
VALUE
ENDPARAM
```

El primer parámetro ofrece la opción de guardar o no el espacio de trabajo y el segundo el nombre con el que guardarlo.

La co-simulación OptSim-Matlab también permite que durante la simulación puedan escribirse, en el archivo *.m de Matlab, datos en un archivo *.dat o *.txt que sean leídos por bloques posteriores. La escritura de estos archivos debe tener una sintaxis concreta para que OptSim la pueda reconocer y ejecutarla sin fallos. A continuación se describe más específicamente la aplicación de los bloques CCM en este trabajo.

Usos de los bloques CCM

En este proyecto los bloques de co-simulación con Matlab han sido utilizados en la creación del canal a partir del modelo para la fibra POF, así como en el diseño del sistema de codificación y decodificación Tomlinson-Harashima. A continuación se explica la creación de estos bloques para los usos anteriores.

La primera aplicación en la que se han utilizado estos bloques ha sido el **modelado del enlace POF**. La integración del modelo de la fibra en el entorno de simulación OptSim se ha realizado diseñando un bloque CCM con los siguientes parámetros que cualquier usuario puede modificar:

- Archivo Matlab: este parámetro contiene el nombre del archivo *.m en el que está el código con el cálculo de la función de transferencia del canal.
- Directorio: se trata del directorio en el que se encuentra el archivo anterior.
- Archivo de salida (*outFile*): se refiere al archivo *.dat en el que se guarda la respuesta del canal para ser leída posteriormente por el bloque que actúa como filtro óptico. Es necesario especificar la ruta completa en la que se encuentra.
- Archivo del sistema (*systemFile*): se trata del *.txt en el que se guarda la configuración del enlace POF, en el Anexo IV se muestra un ejemplo de configuración. Al igual que en el anterior debe especificarse la ruta completa en la que se encuentra.
- Otros parámetros como la longitud de onda central y la anchura a media altura de la fuente.

También se ha realizado otro diseño para la integración del modelo POF en OptSim. Es un diseño que puede resultar más eficiente para algunas aplicaciones en las que se necesite hacer varias simulaciones con repetidos cambios en los elementos, ya que en este caso no se utiliza un archivo *.txt para describir el sistema sino que se usa un parámetro como los anteriormente descritos pero de tipo numérico. El inconveniente que presenta es que para cada tipo de elemento (fibra, conector, receptor, acoplador,...) es necesario un bloque CCM y un archivo *.m distinto.

Las siguientes imágenes muestran los cuadros de diálogo y los parámetros solicitados para un tramo de fibra y un conector, respectivamente.

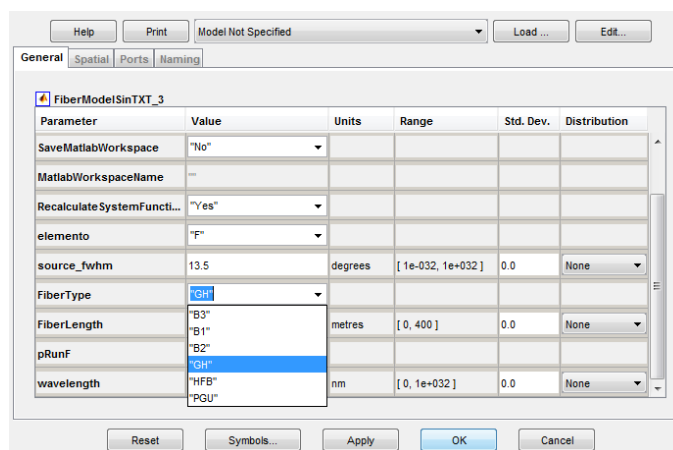


Figura 3.4.- Características del bloque CCM que representa un tramo de POF.

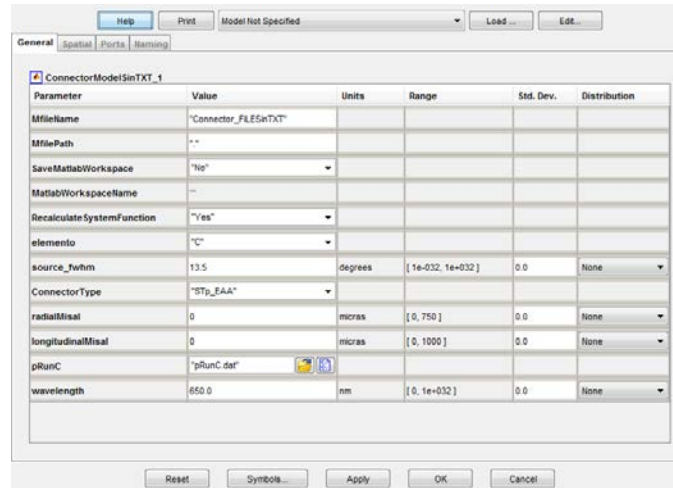


Figura 3.5.- Características del bloque CCM que representa un conector.

Como se ha dicho anteriormente, los bloques de co-simulación con Matlab permiten escribir durante la simulación en archivos de tipo *.dat o *.txt. En el este proyecto esta característica se ha utilizado para escribir, en un archivo del primer tipo, la respuesta frecuencial del canal para su posterior uso en el bloque que actuará como filtro óptico y se encargará de modelar el enlace POF, los datos pueden escribirse tanto en dBs, como en lineal y tanto en amplitud, como en potencia y con fase o sin ella; la estructura de las dos primeras líneas que deben tener estos archivos es la siguiente:

TransferMatrixFormat1 <SubFormat> <FactorFormat>

<# inputs, N> <# outputs, M> <# of wavelength points, K> <Min λ > <Max λ >

Donde <SubFormat> puede ser: POWER, REAL, REAL_IMAG, AMP_PHASE, AMP_PHASE_RAD, POWER_PHASE, POWER_DELAY, POWER_DELAY_PS, AMP_DELAY o AMP_DELAY_PS e indica el formato que tiene la matriz de coeficientes. Y <FactorFormat> puede dejarse vacío o igual a DB. A continuación de estas dos líneas se escriben los datos numéricos del modelo de la siguiente forma:

< $\lambda 1$ > <coefficient 11> <coefficient 12> ... <coefficient 1M>

...

< λK > <coefficient K1> <coefficient K2> ... <coefficient KM>

La segunda aplicación de los bloques CCM ha sido para la implementación de la **técnica de precodificación THP**. Para desarrollar esta técnica ha sido necesario diseñar dos bloques, uno para el codificador y otro para el decodificador. El bloque del codificador tiene dos entradas, una binaria y otra eléctrica, la primera contiene la secuencia binaria considerada como entrada de la codificación y la segunda se corresponde con los parámetros de las señales eléctricas de la simulación. Por otra parte, el decodificador recibe la señal eléctrica tras pasar por el canal y el bloque receptor. Es el encargado de recuperar la secuencia de datos original que posteriormente se comparará con la secuencia de datos generada en el extremo transmisor para evaluar las prestaciones del sistema.

Capítulo 4: ANÁLISIS DE TÉCNICAS DE ECUALIZACIÓN Y RESULTADOS

En las siguientes secciones se explican los distintos estudios de ecualización realizados en este proyecto y se muestran los resultados obtenidos. En primer lugar se ha realizado un amplio estudio utilizando como canal únicamente un tramo de POF para comparar los dos sistemas de ecualización explicados en el Capítulo 2 y determinar para qué situaciones es mejor cada uno de ellos, así como conocer la mejora introducida frente al caso en el que no exista ecualización. La comparación de prestaciones se realiza en términos de la tasa de error de bit (BER, *Bit Error Rate*). Con los resultados de este estudio se ha estudiado la variación del ancho de banda del sistema y de las pérdidas debidas a la potencia. A continuación, se contempla la inclusión de códigos correctores de errores FEC (*Forward Error Correction*) y se muestra la mejora que estos son capaces de introducir. Para terminar este estudio se han obtenido las curvas de sensibilidad en función de la tasa de transmisión para los distintos tamaños de fibra utilizados.

En la siguiente sección se ha realizado otro estudio en el que se muestra la influencia del número de coeficientes de los ecualizadores utilizados en la calidad del sistema y se ha obtenido el número óptimo que logra el equilibrio entre esta calidad y el coste de implementación de los ecualizadores, siendo este proporcional al número de coeficientes que los forman.

Por último, se ha realizado otro estudio que permite evaluar los efectos que introducen los conectores y sus posibles desalineamientos en las prestaciones del sistema, así como su influencia en el ancho de banda y en la atenuación.

Los análisis presentados en este capítulo se han realizado en función de diversos parámetros como son: la tasa de transmisión, la potencia óptica recibida, la longitud del enlace de fibra, la presencia de conectores y el número de coeficientes de los ecualizadores.

4.1.- Aspectos generales y configuración

Para la realización de todas las simulaciones de este capítulo se ha utilizado el mismo esquemático. Éste está formado por los siguientes bloques, más ampliamente descritos en el Anexo IV de esta memoria:

- Generador de secuencias binarias: es el encargado de generar la secuencia inicial que será transmitida por el sistema y que servirá para calcular el BER al final del esquemático.
- Modulador NRZ: Se trata de un bloque compuesto por otros subbloques, de forma que contiene una fuente óptica, un modulador externo y su *driver* eléctrico.
- Filtro óptico: este bloque contiene la respuesta frecuencial del sistema POF y actúa como canal, devolviendo a su salida la señal filtrada en el dominio temporal. En el Anexo IV se ha realizado una amplia explicación sobre su funcionamiento.

- Receptor: este bloque está formado por un fotodetector, un amplificador de transimpedancia y un filtro, se encarga de la conversión opto-eléctrica de la señal.
- Medidor de BER: se encarga de calcular la tasa de error de bit muestreando la señal eléctrica anterior y comparándola con la secuencia inicial binaria.

Además de los bloques anteriores se utiliza un bloque de co-simulación con Matlab (CCM) en el que se calcula la función de transferencia del sistema POF con el modelo matricial explicado en el Capítulo 2 y en el Anexo II de esta memoria. Una vez obtenida esta respuesta, es escrita en un archivo *.dat que es leído por el filtro óptico; este archivo contiene la respuesta frecuencial en módulo y fase, estando el módulo definido en decibelios y la fase en radianes. Este bloque está situado entre el modulador NRZ y el filtro óptico y tiene una opción interna que permite no volver a calcular la respuesta si las características del enlace POF; como por ejemplo las características espaciales de emisor y detector, la longitud de la fibra, el uso de conectores con o sin desalineamientos, etc, no han cambiado. En el Capítulo 3 se ha explicado el diseño de este tipo de bloques en la herramienta de simulación. En la Figura 4.1 se muestra el esquemático utilizado.

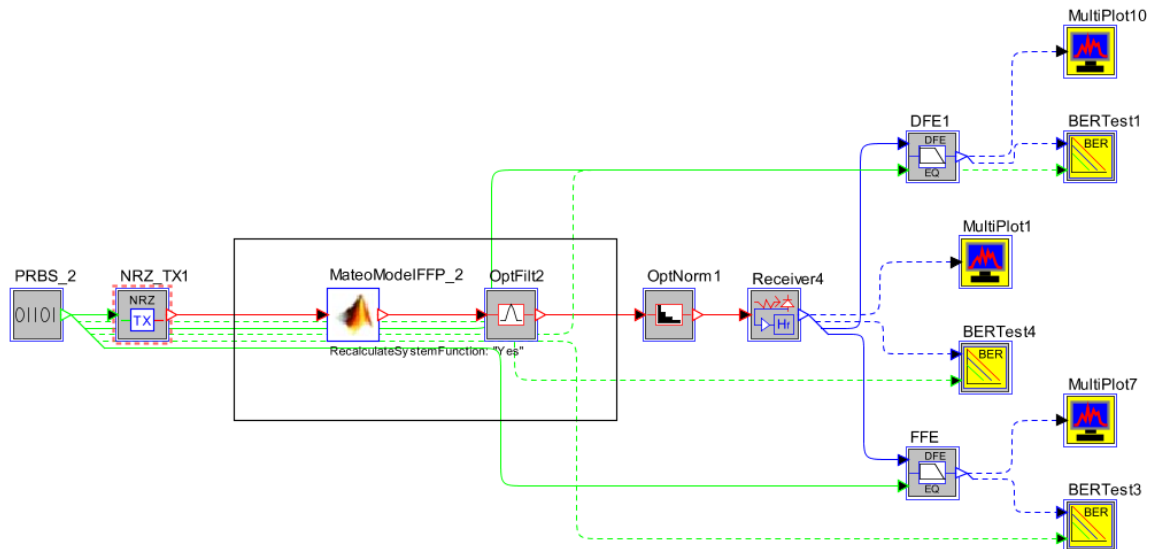


Figura 4.1.- Esquemático del sistema de comunicaciones.

En el receptor se construyen 3 ramas: en la rama superior se simula el uso de un ecualizador DFE, en la rama inferior se simula el uso de un ecualizador FFE y la rama central servirá para evaluar el sistema sin ecualización; ambos ecualizadores tienen implementada la optimización MMSE mencionada en el Capítulo 2. En el Anexo IV se realiza una explicación de cada bloque nombrando sus parámetros más importantes.

La evaluación de las prestaciones de las técnicas de ecualización se ha realizado midiendo el BER en el receptor en función de la potencia óptica a la entrada del mismo. Este valor de potencia óptica es el parámetro común que permite comparar distintos sistemas independientemente de la configuración del enlace POF. Para fijar el valor de potencia óptica a la entrada del receptor y poder variarla en sucesivas simulaciones se ha usado un normalizador óptico, como se puede observar en el esquemático de la Figura 4.1. Este bloque, situado entre la salida del enlace POF y el receptor y denominado *OptNorm1*, se configura a través de un parámetro que representa el nivel de potencia óptica a su salida. El rango de valores utilizado se incluye en la Tabla 4.1.

Ésta recoge los parámetros utilizados en las simulaciones de este capítulo junto con los rangos de valores que serán utilizados en los siguientes apartados, así como sus valores por defecto.

Parámetro	Valor por defecto	Rango de valores
Tasa de transmisión	300 Mb/s	100 Mb/s-10 Gb/s
Potencia recibida	-24 dBm	-32-(-20) dBm
Longitud de la fibra	50 metros	10-400 metros
Número de coeficientes	5 <i>feed-forward</i>	3-25 (<i>feed-forward</i> y <i>feed-back</i>)
	14 <i>feed-back</i>	
Número de conectores	0	0-14
BER	10^{-6}	$10^{-15} - 1$

Tabla 4.1.- Valores por defecto y rango de valores de los parámetros utilizados en las simulaciones.

Las representaciones de BER tienen un valor mínimo de 10^{-15} , se ha elegido este valor porque es el suficiente para que la comunicación sea considerada sin errores. Como criterio de calidad se ha considerado que la transmisión debe realizarse con un BER máximo de 10^{-6} , siendo este el valor que usaremos para calcular penalizaciones o mejoras ofrecidas por los distintos sistemas simulados.

4.2.- Análisis de las técnicas de ecualización para un tramo de POF

El objetivo de estos experimentos ha sido hacer un estudio que permita ofrecer información acerca de las limitaciones en ancho de banda y en potencia que sufre un sistema de comunicaciones basado en POF. Según el parámetro que se ha querido estudiar, se han fijado el resto de acuerdo los valores de la Tabla 4.1. En esta sección, con el objetivo de analizar únicamente el efecto de la fibra en las prestaciones del sistema y no aumentar en exceso el tiempo de simulación, se ha considerado un enlace que sólo consiste en un tramo de POF.

4.2.1.- Estudio en función de la tasa de transmisión

En primer lugar se ha analizado cuál es la máxima tasa de transmisión aceptable para distintas longitudes del enlace. Con este propósito, se ha fijado la longitud de la POF y se han obtenido curvas de BER frente a potencia recibida para tasas de transmisión que varían entre 100 Mb/s y 10 Gb/s. En las Figuras 4.2 y 4.3 se muestran dos de los casos mencionados, el primero para una longitud de 50 metros y el segundo para una de 150 metros.

Puede observarse cómo con la ecualización podemos transmitir a tasas muy superiores a las que se transmite sin ecualización. Así, con la técnica de ecualización FFE, se obtienen mejoras de aproximadamente 2 dB para el valor de BER referencia de 10^{-6} , mientras que en esa misma condición la ecualización DFE ofrece margen de mejora de 2.5 dB. Estos resultados demuestran las ventajas que ofrece la ecualización.

Si comparamos los dos tipos de ecualizadores considerados, se observa que trabajando a bajas tasas de transmisión ambos consiguen unos valores de BER similares, incluso cuando se trabaja sin ecualización. Las diferencias aparecen para tasas de transmisión a partir de 1 Gb/s, entonces la técnica DFE es mejor que la FFE ya que permite la transmisión de datos en Gigabit Ethernet

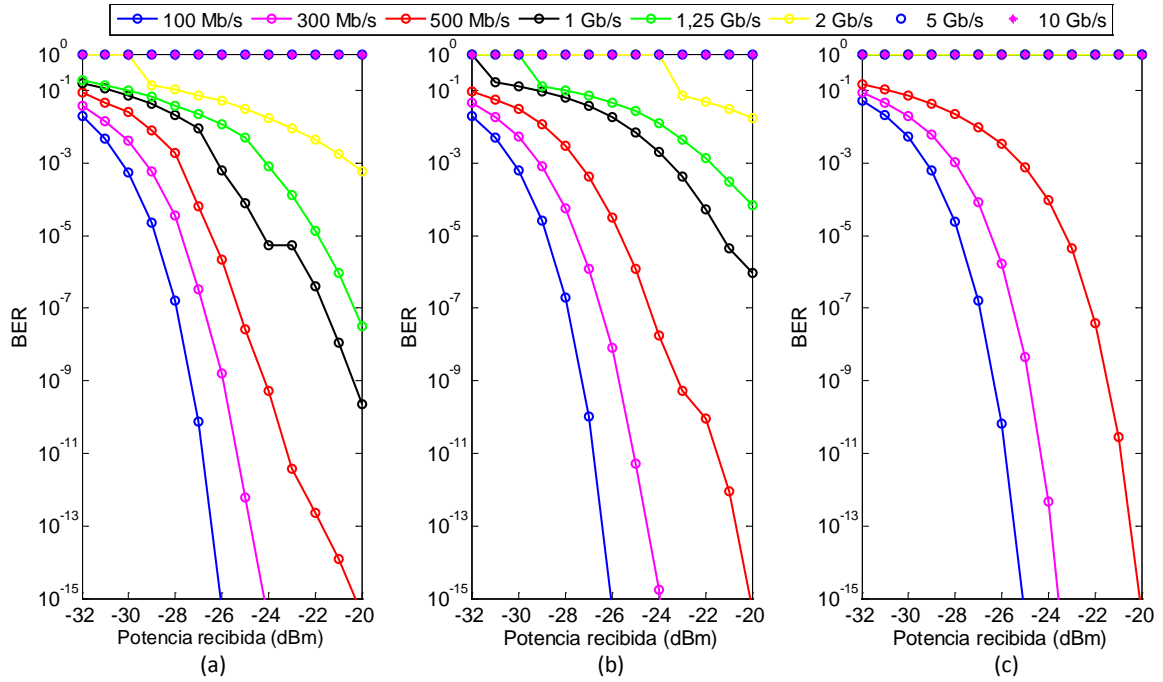


Figura 4.2.- Representación del BER con una fibra de 50 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.

(1.25 Gb/s) con tasas de error aceptables e incluso llegar a 2 Gb/s para potencias recibidas mayores y si consideramos la inclusión de códigos correctores FEC. Por el contrario con la ecualización FFE los errores empiezan a aparecer a potencias cada vez menores.

A continuación se muestran los resultados de un estudio análogo, esta vez para una longitud de 150 metros, en la Figura 4.3 puede verse como los errores aparecen a tasas de transmisión mucho más bajas que en el caso anterior, sólo las transmisiones hasta 500 Mb/s alcanzan tasas de error aceptables, éste valor desciende hasta los 100 Mb/s en el caso de trabajar sin ecualización.

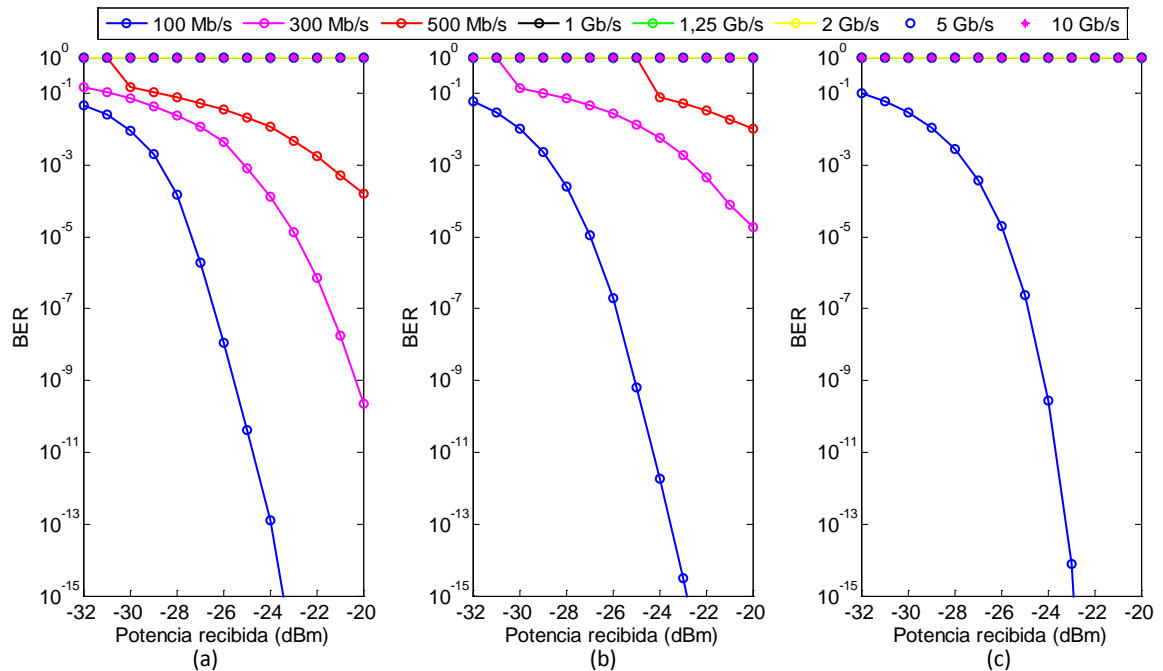


Figura 4.3.- Representación del BER con una fibra de 150 metros, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.

Comparando las Figuras 4.2 y 4.3 se observa cómo, en la curva de 100 Mb/s, al aumentar la longitud de la fibra en un factor 3, aumenta el valor de potencia recibida necesaria para tener un BER de 10^{-15} (lo que podemos considerar una transmisión libre de errores); en el caso del DFE unos 2.5 dB más, el FFE 3 dB y sin ecualización unos 2 dB. Por otra parte, se observa que el aumento de longitud del enlace no sólo implica un desplazamiento de las curvas de BER hacia valores mayores de potencia, sino que introduce un efecto umbral que limita la máxima tasa de transmisión aceptable.

Con el objetivo de encontrar la causa de la degradación de prestaciones observada, se ha obtenido la respuesta en frecuencia del enlace POF. En la Figura 4.4, se muestran los módulos de las respuestas frecuenciales para las longitudes de 50 metros y 150 metros en escala lineal. En la primera puede verse el efecto que tienen las pérdidas relacionadas con la disminución de la potencia recibida sobre la respuesta frecuencial, mientras que en la segunda los módulos han sido normalizados para tener una mejor visualización de los cambios sufridos en el ancho de banda. Analizando más en detalle estas gráficas, se obtiene un aumento de las pérdidas introducidas por la fibra de 14 dB, lo cual supondrá la necesidad de disponer de fuentes con mayor potencia en el extremo transmisor para alcanzar los valores de potencia óptica considerados a la entrada del receptor. En cuanto al ancho de banda, el sistema experimenta una reducción también notable, pasando de 160 a 45 MHz.

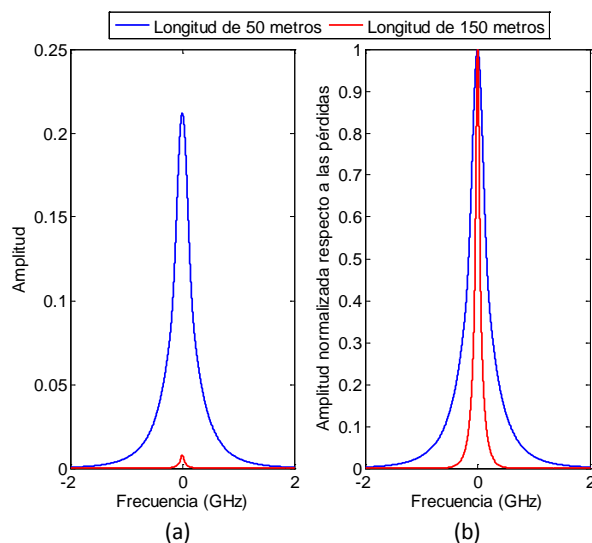


Figura 4.4.- Respuesta frecuencial del sistema POF: (a) sin normalizar respecto a las pérdidas del canal y (b) normalizada frente a las pérdidas del canal.

Por tanto, se puede concluir que el empeoramiento de prestaciones es debido al efecto conjunto de la pérdida de potencia y la disminución de ancho de banda. A continuación se muestra una imagen que permite comprobar la aparición de ambos efectos. La Figura 4.5 contiene los diagramas de ojo obtenidos bajo diferentes condiciones: las tres imágenes de la izquierda muestran la degradación sufrida por la reducción del ancho de banda y las imágenes de la derecha el efecto sufrido por el aumento de las pérdidas de potencia. La obtención de los diagramas de ojo de la izquierda se ha realizado utilizando tasas de transmisión de 100 Mb/s, 300 Mb/s y 500 Mb/s para una longitud de la fibra de 50 metros y un valor de potencia óptica recibida de -25 dBm. Para hacer los diagramas de la derecha se ha elegido también la fibra de 50 metros; mientras que, a diferencia del caso anterior, se ha dejado fija la tasa de transmisión

en 300 Mb/s y se ha variado la potencia recibida, utilizando valores de -28, -26.5 y -23.6 dBm que se corresponden con los valores de BER de 10^{-3} , 10^{-5} y 10^{-15} , respectivamente. En ambos casos los diagramas de ojo representados se corresponden con la rama sin ecualización para conocer únicamente los efectos de la fibra en el sistema de comunicaciones.

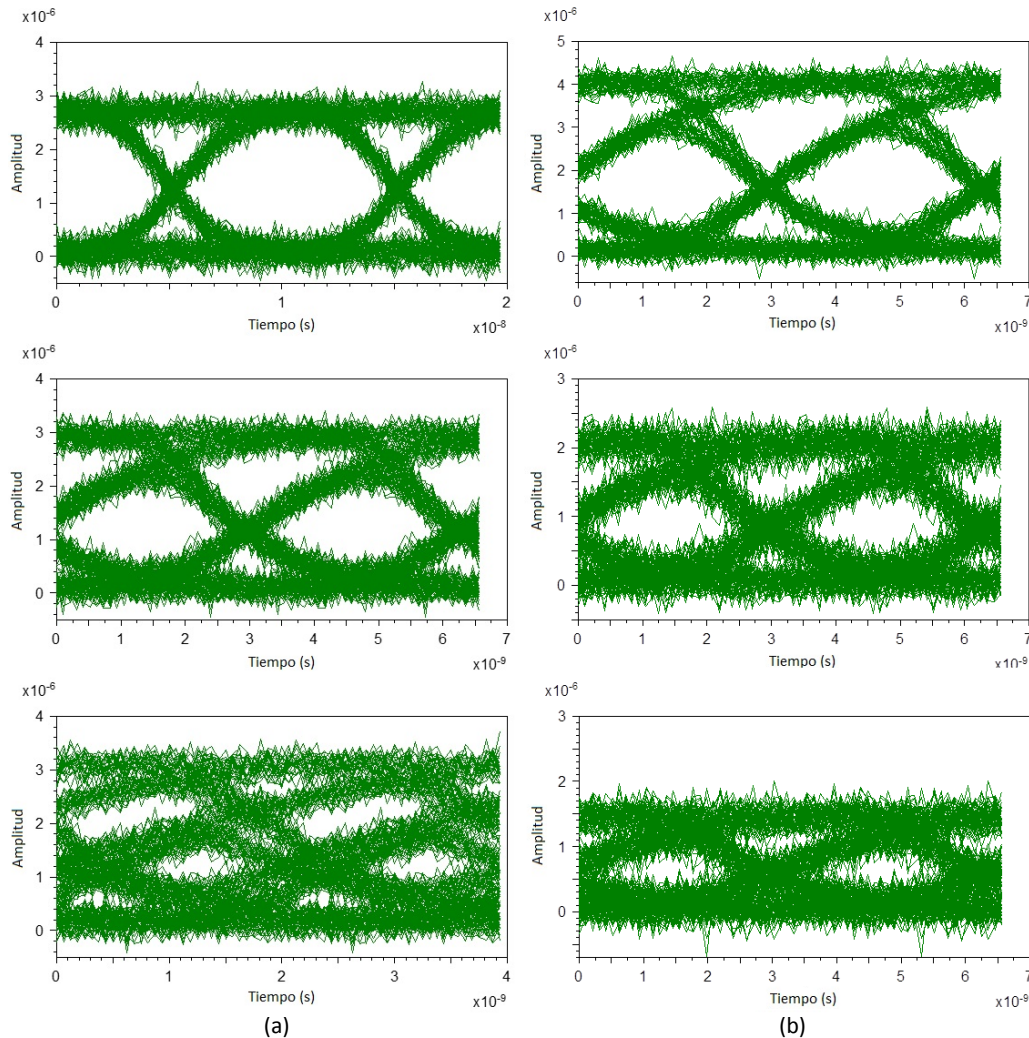


Figura 4.5.- Diagramas de ojo con los efectos de: (a) la disminución del ancho de banda y (b) la disminución de la potencia recibida.

Respecto al efecto de la reducción del ancho de banda del sistema (Figura 4.15 (a)), se puede observar en los diagramas de ojo cómo el nivel de amplitud se mantiene constante. Además, a medida que aumenta la tasa de transmisión la forma del ojo se va degradando y su apertura va disminuyendo por efecto de la interferencia intersimbólica (ISI). En la tercera imagen (tasa de 500 Mb/s) la ISI provoca la mezcla de los símbolos transmitidos y un diagrama de ojo cerrado, lo que provoca una tasa de error de 10^{-3} .

Por otra parte, al analizar cómo afectan las pérdidas de potencia ((Figura 4.15 (b))), se observa que al tener una menor potencia recibida el nivel de amplitud del diagrama también es menor, mientras que la potencia de ruido se mantiene constante. Por tanto una reducción de la potencia óptica recibida provoca una disminución de la apertura del ojo, pudiendo degradarse la calidad de la transmisión de valores de BER de 10^{-15} a valores de 10^{-3} para reducciones de potencia de 4.4 dB.

4.2.2.- Estudio en función de longitud de la fibra

Tras conocer las máximas tasas de transmisión para distintas longitudes de fibra, nos hemos planteado realizar un análisis similar a partir del cual podamos obtener cuál es la máxima longitud de enlace viable en función de la tasa de transmisión. En las Figuras 4.6 y 4.7 se muestran los resultados obtenidos para 300 Mb/s y 1.25 Gb/s, respectivamente.

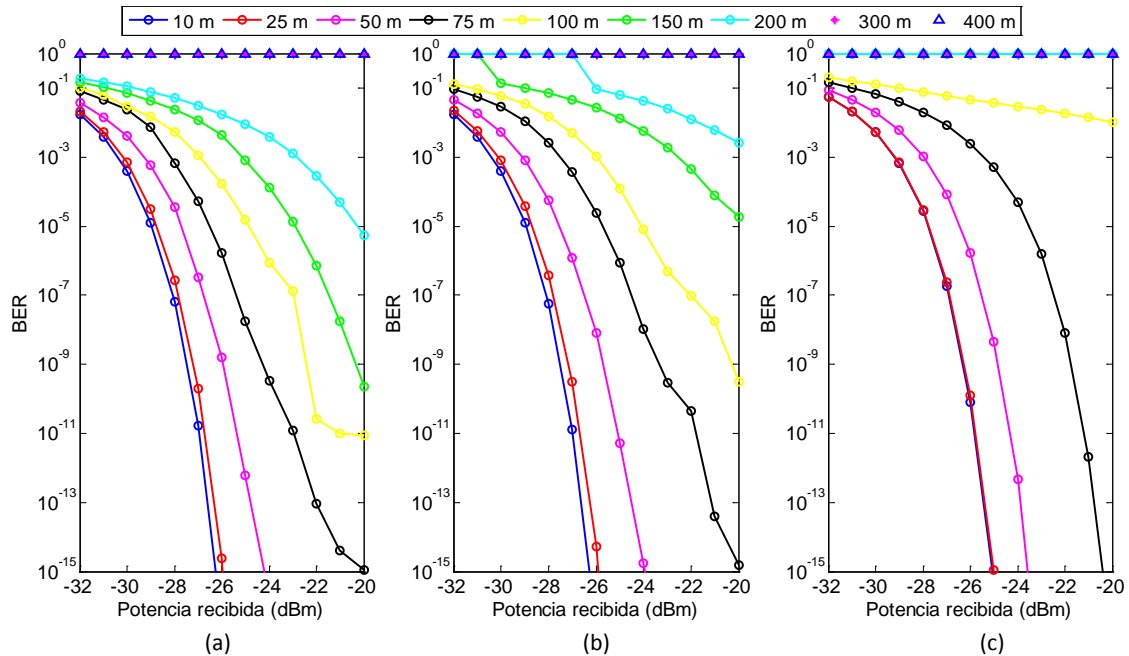


Figura 4.6.- Representación del BER con una tasa de transmisión de 300 Mb/s, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.

El efecto global observado en estas gráficas es el mismo ya observado en el análisis anterior, al aumentar la tasa de transmisión empeoran las prestaciones. En este caso también es necesario aumentar la potencia recibida si se desea mantener el mismo valor del BER pero a diferencia del caso anterior, ahora este aumento es aproximadamente constante para los tres métodos utilizados.

En la Figura 4.7 se observa la degradación en las prestaciones respecto a la Figura 4.6; así, tomando como tasa de error el valor de referencia y para una tasa de transmisión de 100 Mb/s se produce una degradación en potencia de 1 dB para el DFE, de 0.6 dB para el FFE y también de 1 dB para el caso sin ecualización. También puede verse como hay que disminuir la longitud del tramo de fibra para tener una buena comunicación. Mientras que para la tasa de 300 Mb/s se podrían usar enlaces con longitudes de hasta 200 metros, para transmitir a 1.25 Gb/s la longitud máxima es de 75 metros.

A partir de los resultados obtenidos y que también se muestran en el Anexo VI se puede deducir que tanto para el ecualizador DFE como para el FFE existen longitudes de la fibra y tasas de transmisión para las que la secuencia de datos transmitida sería recibida con una tasa de error inaceptable. Así por ejemplo si se trabaja con una tasa de 10 Gb/s solo se podría realizar una transmisión que pudiese considerarse aceptable para la longitud de 10 metros, con las demás la tasa de error sería excesiva. Ocurre lo mismo con las longitudes de la fibra, si el tramo de fibra es grande la transmisión también será errónea.

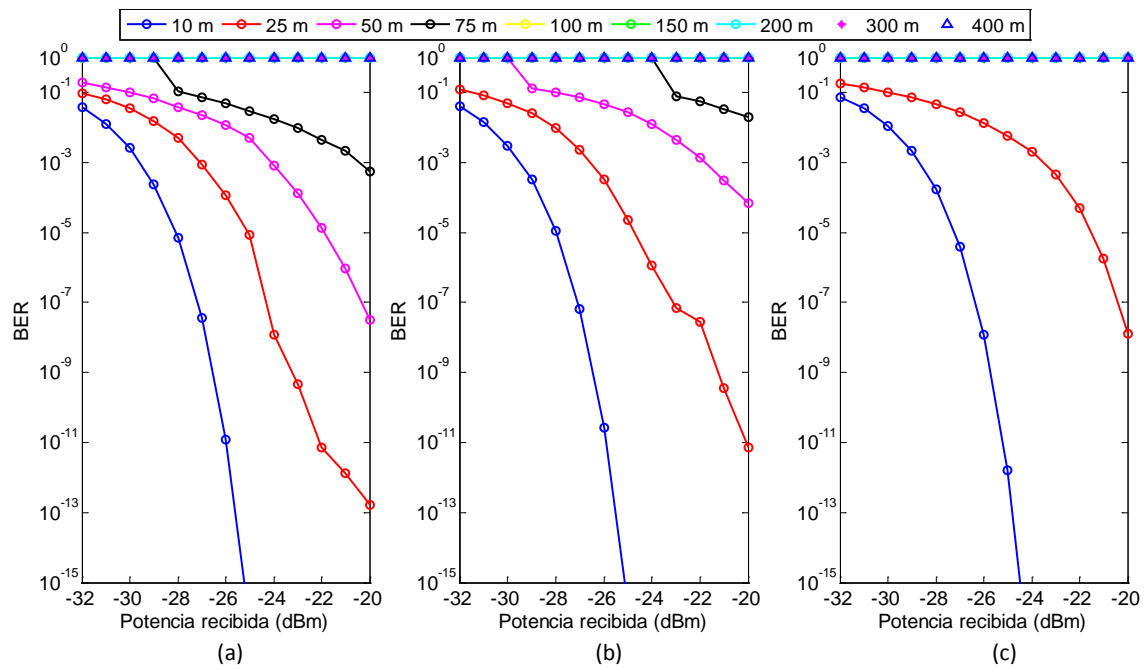


Figura 4.7.- Representación del BER con una tasa de transmisión de 1.25 Gb/s, en escala logarítmica y para tres situaciones: (a) usando el ecualizador DFE, (b) usando el ecualizador FFE y (c) sin ecualización.

Como conclusiones generales de los análisis realizados, podemos decir que si se desean conseguir altas tasas de transmisión, por ejemplo trabajar entre 1.25 y 2 Gb/s, deben utilizarse longitudes no mayores de 50 metros para que la transmisión pueda realizarse con un número de errores asumible, que pueda corregirse con alguna otra técnica de corrección en el receptor. Si se quieren utilizar tramos de fibra de gran tamaño deben elegirse entonces valores para la tasa de transmisión que no superen los 500 Mb/s. Aparece un compromiso entre longitud y tasa de transmisión que debe resolverse para cada escenario particular en función del ámbito de aplicación del enlace POF. La Figura 4.8 muestra el producto ancho de banda-distancia del sistema.

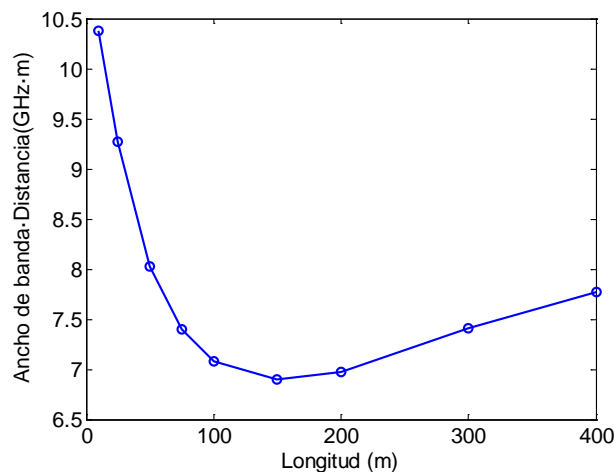


Figura 4.8.- Producto ancho de banda-distancia.

En esta representación se puede observar el compromiso existente entre la longitud de la fibra y el ancho de banda que ofrece. Así, para las longitudes de fibra más pequeñas hay un gran ancho de banda, que sólo está disponible en enlaces muy cortos. Por el contrario, para las longitudes más grandes el ancho de banda se reduce drásticamente hasta llegar a una longitud

en torno a los 150 metros, a partir de la cual la disminución de ancho de banda es más ligera. A pesar de la recuperación observada en el producto ancho de banda-distancia a partir de esta longitud, es necesario considerar el fenómeno de la atenuación en la POF, que alcanza valores muy grandes para estas distancias. De esta forma, los valores óptimos de operación de los enlaces POF estarán habitualmente por debajo de 100 metros, siendo las distancias cubiertas habituales del orden de 25 o 50 metros para los que se dispone de un ancho de banda de 370 y 160 MHz, respectivamente.

También se ha estudiado como se ven afectados el ancho de banda a 3 dB y el valor máximo de la respuesta frecuencial de la fibra al variar su longitud. En la Figura 4.9 (a) puede verse la evolución de este ancho de banda que tiene una tendencia exponencial y decreciente al aumentar la longitud de la fibra producida principalmente por la dispersión modal en la fibra y el acoplo entre modos, tal y como describe el modelo de POF que usamos [4].

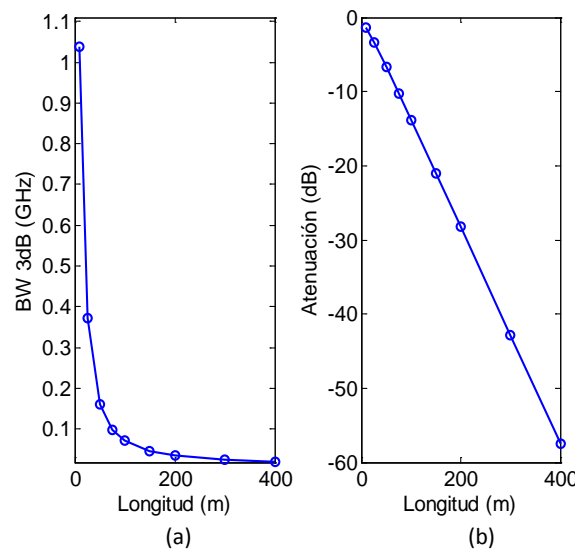


Figura 4.9.- (a) Variación del ancho de banda a 3 dB y (b) variación de la atenuación que sufre el sistema POF.

En la Figura 4.9 (b) puede observarse como cambia el valor máximo de la respuesta frecuencial de la fibra. Se trata de una evolución lineal y descendente a medida que aumenta la longitud de la fibra. Este comportamiento es debido al aumento de la atenuación que introduce la fibra a medida que su longitud aumenta.

4.2.3.- Estudio de sensibilidad y conclusiones

Para completar el estudio del sistema POF empleado y a modo de resumen se calculó la sensibilidad que necesitaríamos en recepción para tener al final el valor de BER deseado. Se calculó para un valor de BER de 10^{-6} , usando un ecualizador DFE y sin ecualización; los resultados en escala logarítmica se muestran en la Figura 4.10.

De esta figura se concluye que el valor de sensibilidad se ve afectado tanto por la longitud como por la tasa de transmisión. Para una cierta tasa de transmisión, a medida que se aumenta la longitud de la POF la potencia óptica recibida necesaria para alcanzar el valor de BER deseado también lo hace. También ocurre que para las longitudes más grandes sólo tendríamos potencia

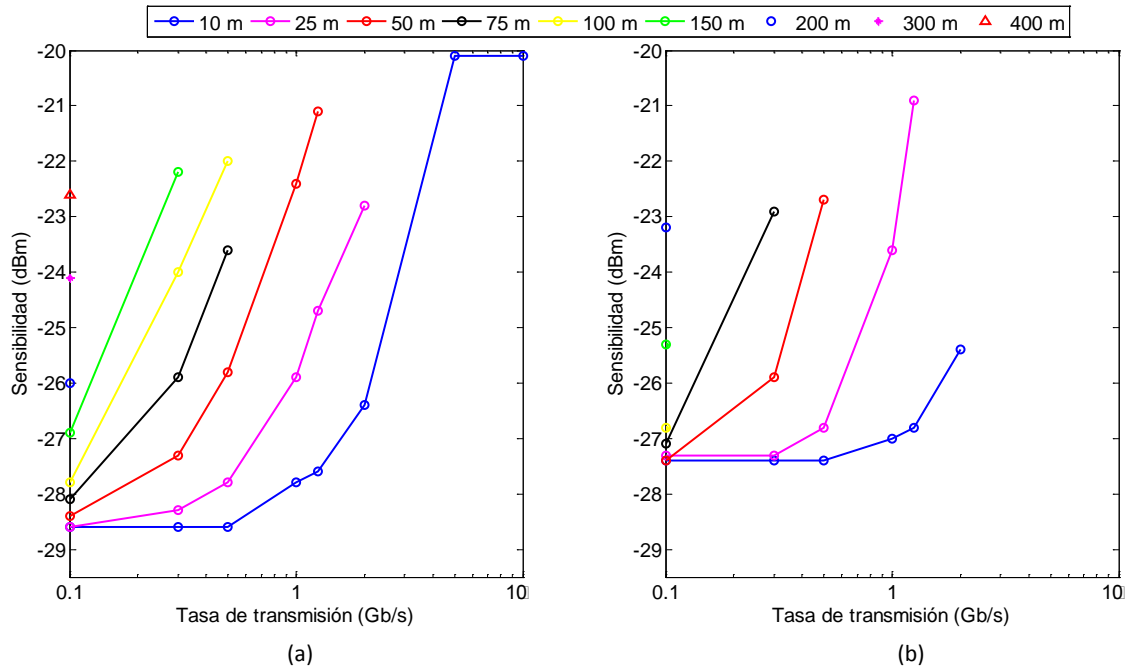


Figura 4.10.- Sensibilidad para un BER de 10^{-6} con (a) ecualización DFE y (b) sin ecualización.

suficiente para trabajar con la tasa de transmisión más baja considerada (100 Mb/s). Los resultados obtenidos y su representación gráfica presentada en la Figura 4.10 constituyen una herramienta muy útil para el diseñador, que puede de forma visual conocer la potencia óptica que debe asegurar a la entrada del receptor para cumplir los requisitos de calidad en la transmisión. A partir de este valor y con un simple balance de potencias puede calcular las características de la fuente óptica que precisa en el extremo transmisor.

Comparando los dos tipos de receptores considerados puede verse el buen funcionamiento de la ecualización ya que permite trabajar con mayores longitudes de fibra y a mayores tasas de transmisión con un menor requerimiento de potencia. Por ejemplo, sin ecualización no se puede trabajar a una tasa de 10 Gb/s, por el contrario con ecualización si se podría trabajar con la mayor de las tasas estudiadas. En cuanto a los valores de potencia recibida, se observa como efecto general un aumento de la sensibilidad necesaria de en torno a 1 dB en el caso de no usar ecualización. Además, esta penalización aumenta hasta 3 dB y valores superiores para longitudes de fibra elevadas.

4.2.4.- Introducción de códigos correctores de errores (FEC)

Además de los análisis de prestaciones presentados anteriormente, también se ha evaluado la calidad de la transmisión cuando se introduce en el receptor la técnica de corrección de errores FEC. Esta técnica permite la corrección de errores en el receptor sin que sea necesaria la retransmisión de la información inicial, esto se consigue añadiendo un conjunto de bits de redundancia al mensaje original, en este estudio se ha trabajado con un corrector Reed Solomon de 255 bytes de los cuales 239 son de datos. La ganancia en términos de disminución de BER que introduce el código corrector de errores se muestra en la Figura 4.11. En ésta figura puede observarse como a partir de un valor de BER de entrada al algoritmo corrector de errores de aproximadamente 10^{-3} , el BER a la salida del algoritmo FEC mejora varios órdenes de magnitud.

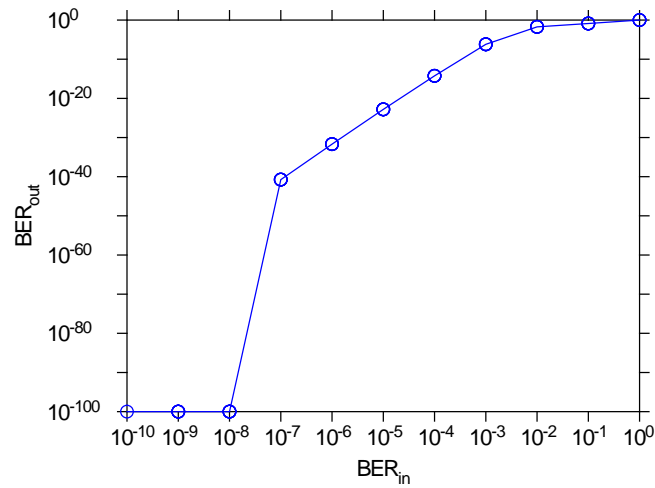


Figura 4.11.- Ganancia del código FEC.

Para demostrar el correcto funcionamiento de este mecanismo en la Figura 4.12 se muestran los resultados de tasa de error obtenidos para una longitud de 25 metros y dos tasas de transmisión de 100 Mb/s y 1 Gb/s en los casos de aplicación y no aplicación del algoritmo de corrección de errores FEC.

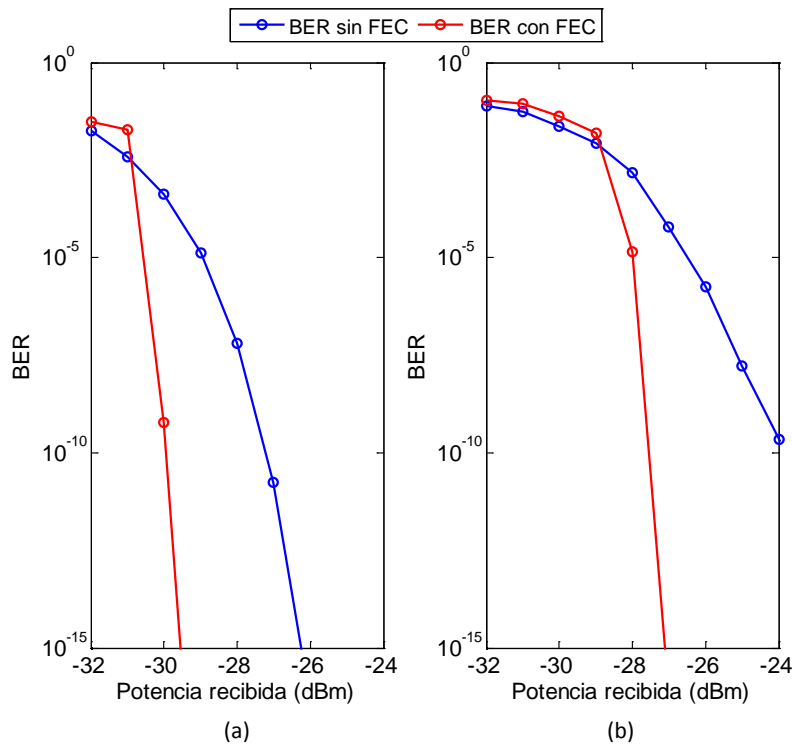


Figura 4.12.- Comparativa de BER con y sin FEC para una longitud de 25 metros: (a) para una tasa de transmisión de 100 Mb/s y (b) para una tasa de transmisión de 1 Gb/s.

Como puede observarse, cuando la tasa de error es elevada, la técnica de corrección errores no es capaz de mejorar las prestaciones dando resultados incluso peores. Es a partir de un valor de BER de 10^{-3} que la técnica es capaz de corregir errores y por tanto mejorar las prestaciones. Dicho de otra forma, al aumentar la tasa de transmisión es necesario también aumentar la potencia recibida para obtener la mejora en las prestaciones que ofrece este código corrector. Así, la introducción de códigos correctores supone una mejora sustancial de las prestaciones

permitiéndonos desplazar nuestro criterio de calidad de BER inferior a 10^{-6} a BER inferior a 10^{-3} . Esta mejora se produce con un coste moderado debido principalmente a la introducción de redundancia y disminución de la tasa de transmisión efectiva.

4.3.- Configuración de las técnicas de ecualización

Tras analizar las mejoras introducidas por las técnicas de ecualización consideradas, en este apartado se presenta el estudio de prestaciones del sistema en función del número de coeficientes de los ecualizadores. Los resultados mostrados en esta sección permitirán encontrar el número óptimo de coeficientes para reducir los costes de diseño.

Las Figuras 4.13 y 4.14 muestran la evolución del BER en un enlace POF con una potencia transmitida de 20 dBm a 500 Mb/s frente al número de coeficientes para ecualizadores FFE y DFE, respectivamente. Como puede observarse, el número óptimo de coeficientes varía en función de la longitud del tramo de fibra utilizado. Se ha elegido el rango representado en la Figura 4.13 porque es el que nos proporciona valores de tasa de error que son obtenidos frecuentemente en los estudios experimentales; por encima de la longitud de 120 metros los resultados obtenidos eran inaceptables para una buena comunicación, y en longitudes por debajo de 85 metros las tasas de error obtenidas eran demasiado pequeñas para ser obtenidas con aparatos de medida experimentales. Así pues, en la Figura 4.13 se observa que para longitudes de hasta 90 metros el número óptimo de coeficientes del FFE es 5 y a partir de ella este número se desplaza hacia valores superiores. De este estudio se puede concluir que trabajar por encima o por debajo del número de coeficientes óptimo produce un empeoramiento de las prestaciones en términos del BER obtenido. Este empeoramiento es menos notable para longitudes más altas, en las que permanece más constante con las variaciones del número de coeficientes.

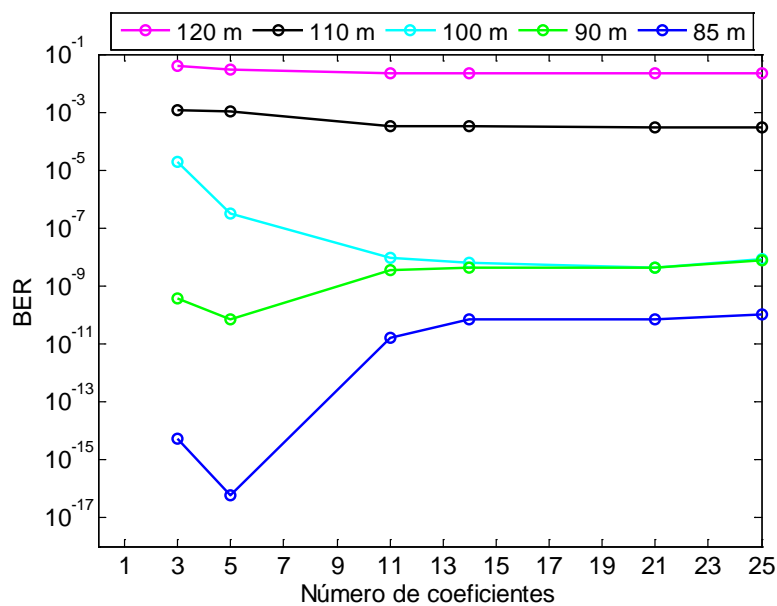


Figura 4.13.- Variación del BER en función de la longitud de la fibra y del número de coeficientes del ecualizador FFE para una tasa de transmisión de 500 Mb/s.

Análogamente al estudio anterior, también se ha estudiado el comportamiento del BER para el ecualizador DFE; en este caso se investiga la influencia de los dos tipos de coeficientes que aparecen en la estructura de este ecualizador (coeficientes *feed-back* y coeficientes *feed-forward*), en el BER al final del sistema con un tramo de POF de longitud fija de 90 metros.

El efecto más notable observado en los resultados, mostrados en la Figura 4.14, es el hecho de que el número de coeficientes *feed-forward* afecta en mayor medida a las prestaciones del sistema que el número de coeficientes *feed-back*. Tomando como referencia los coeficientes *feed-forward*, puede verse que el número óptimo se encuentra en 5 ya que a partir de este valor las curvas de BER aumentan. En cuanto a los coeficientes *feed-back*, se puede observar cómo a partir de un valor, en este caso entre 5 y 7, las variaciones de BER son muy pequeñas. Mirando la curva considerada como óptima según el número de coeficientes *feed-forward* (coef FF = 5) se obtiene un valor óptimo *feed-back* de 15 coeficientes; con el resto de curvas se deduce que si se utiliza un número de coeficientes *feed-forward* superior también es necesario un aumento del número de coeficientes *feed-back*, lo que implica un aumento de los costes de diseño del ecualizador, además de no conseguirse una mejora del BER.

Por lo tanto, para obtener valores de BER lo más pequeños posible es necesario diseñar un ecualizador con un número de coeficientes igual a los óptimos para, a su vez, no aumentar los costes de diseño innecesariamente.

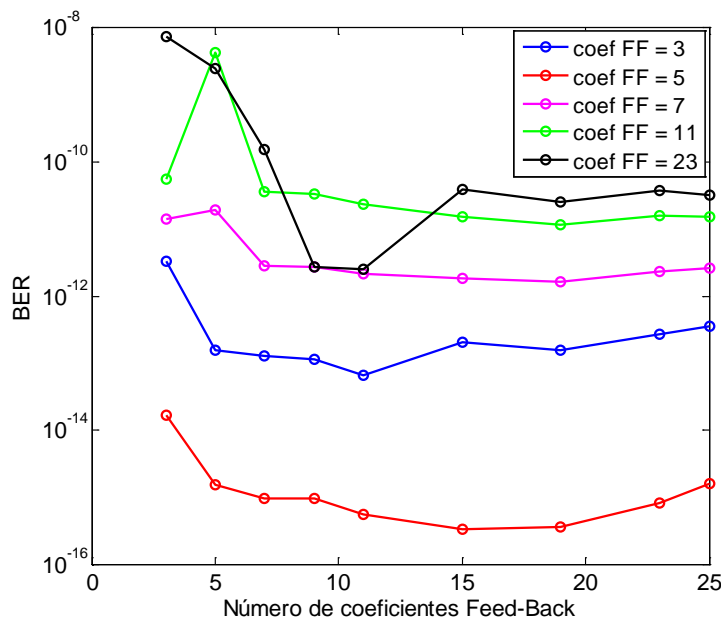


Figura 4.14.- Variación del BER en función del número de coeficientes del ecualizador DFE.

Respecto al rango de longitudes de la fibra utilizado en la Figura 4.13, se ha obtenido que para la longitud de 85 metros basta con tener 3 coeficientes *feed-forward* para lograr una buena comunicación. En el rango que va desde los 90 metros hasta los 110 metros este número aumenta hasta 5 y a partir de esta longitud ningún número de coeficientes permite obtener una comunicación con tasas de error aceptables.

4.4.- Estudio con conectores y desalineamientos

En este apartado se ha estudiado el efecto que tienen los conectores en un sistema de comunicación basado en POF. Para ello se ha considerado un enlace POF compuesto por varios tramos de fibra unidos mediante conectores. En todas las simulaciones se ha utilizado la misma longitud total de fibra de 60 metros, entendida ésta longitud como la suma de todos los tramos entre conectores, pero en cada caso se han utilizado tramos de distinta longitud, y un valor de potencia óptica recibida de -24 dBm.

En la Figura 4.15 se representa el BER obtenido utilizando un ecualizador DFE (Figura 4.15(a)) y el caso sin ecualización (Figura 4.15 (b)). Se comprueba cómo a medida que aumenta el número de conectores la tasa de error empeora. También se observa que al aumentar la tasa de transmisión el BER también lo hace hasta alcanzar valores inaceptables.

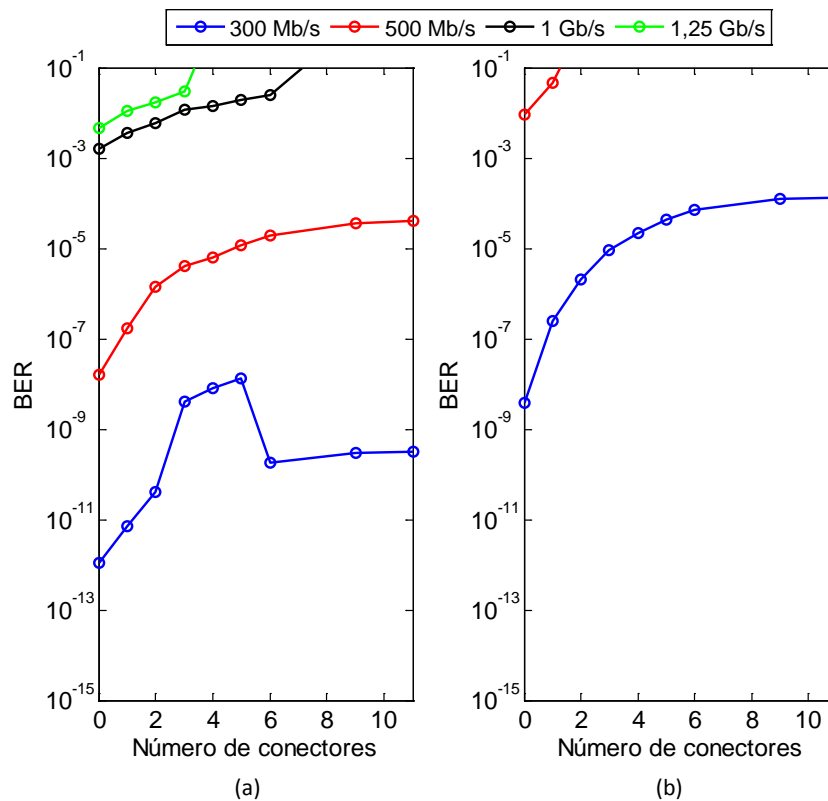


Figura 4.15.- BER frente al número conectores: (a) con el DFE y (b) con el FFE.

Dado que la potencia óptica recibida se ha mantenido fija en este estudio, la degradación de prestaciones con el número de conectores está causada por la disminución de ancho de banda experimentada por el enlace. Si bien es importante tener en cuenta que en un sistema la atenuación introducida por los conectores también será determinante, ya que fijará la potencia óptica necesaria en la fuente y por tanto la viabilidad del enlace.

Para interpretar mejor los resultados obtenidos, se ha analizado la variación del ancho de banda y de la atenuación introducida por el enlace POF con conectores, de forma análoga a como se obtuvo en el apartado 4.2.2. Los resultados se muestran en la Figura 4.16.

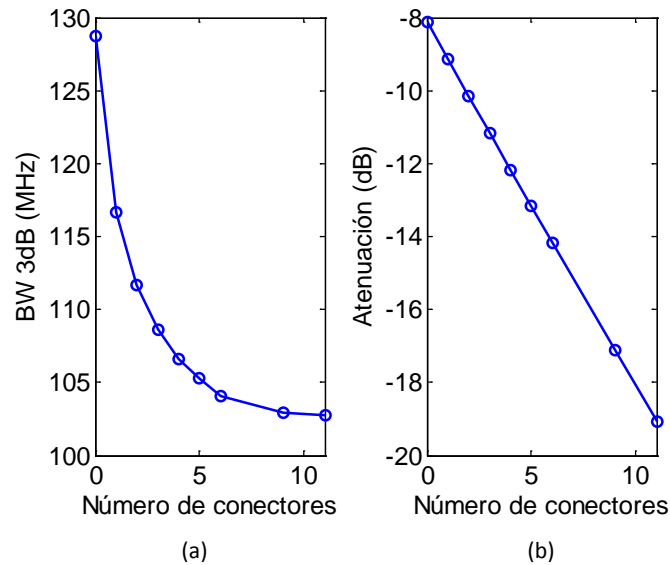


Figura 4.16.- (a) Ancho de banda a 3 dB y (b) atenuación de la respuesta frecuencial de la POF.

Es importante notar, que a diferencia de los resultados mostrados en la Figura 4.9, en este caso la longitud total del enlace se mantiene constante y los cambios en atenuación y ancho de banda son introducidos por la presencia de conectores. Respecto a la atenuación, se observa un comportamiento lineal al igual que en el estudio de la variación de las longitudes realizado en el apartado 4.2.2, lo cual es lógico si asumimos que las pérdidas introducidas por cada conector pueden considerarse constantes. El comportamiento del ancho de banda a 3 dB es similar, con una disminución exponencial al aumentar el número de conectores, si bien en este caso esta reducción es mucho más leve. A la vista de ambas gráficas se puede concluir que el ancho de banda del enlace POF se ve afectado de forma leve por la introducción de conectores y esta dependencia es exponencial con el número de conectores.

Para terminar este apartado se realizó un análisis para averiguar si el desalineamiento entre tramos unidos por conectores afecta al resultado final. El modelo de conector empleado considera dos tipos de desalineamiento, el axial y el longitudinal. El primero describe los desplazamientos transversales de las fibras sobre su posición óptima, mientras que el segundo describe la distancia entre los dos extremos de la fibra en el interior del conector. Para estos dos tipos de desalineamiento, se han considerado valores máximos de 750 μm para el axial y 1000 μm para el longitudinal. A partir de los resultados obtenidos en la Figura 4.17 se ha podido dilucidar que para los tipos de fibra y conector utilizados los resultados solo sufren pequeños cambios respecto al caso sin desalineamiento.

En estas gráficas está representada la variación del BER para dos tramos de fibra de 30 metros unidos por un conector y todas las tasas de transmisión definidas en la Tabla 4.1 con la potencia recibida por defecto. De estos resultados se deduce que la introducción de desalineamiento en los conectores apenas afecta en el BER. El peor de los casos ocurre con el desalineamiento axial en el que para todas las tasas el BER es peor que sin desalineamiento, también hay un empeoramiento en el caso de usar los dos tipos de desalineamientos pero en el caso de usar el longitudinal se produce el efecto contrario ya que para determinadas tasas de transmisión el BER es menor que en caso de que los tramos de fibra estén alineados.

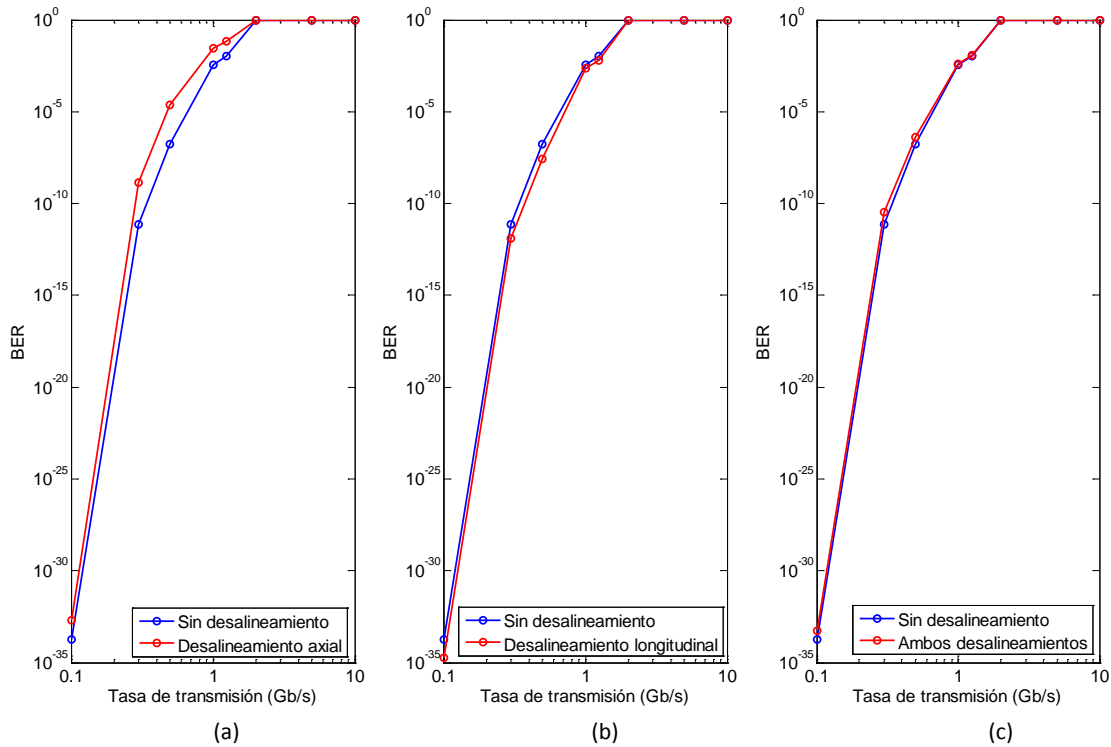


Figura 4.17.- Comparación del BER en función de la tasa de transmisión, con desalineamiento y sin él, con ejes logarítmicos y utilizando un ecualizador DFE: (a) Desalineamiento axial, (b) desalineamiento longitudinal y (c) ambos desalineamientos, para dos tramos de 30 metros de POF unidos por un conector.

Aparentemente, este comportamiento no es el esperado pero se explica teniendo en cuenta que cuanto más separados están los tramos de fibra menor proporción de potencia óptica es capturada por el tramo receptor, siendo la luz que se pierde aquella que se radia con ángulos más grandes, y por tanto la asociada a modos de mayor orden que se propagan más lentamente por la fibra. De esta forma, al introducir desalineamiento longitudinal en los conectores estamos realizando un filtrado espacial que elimina los modos que más contribuyen al aumento de la dispersión y por tanto al empeoramiento del ancho de banda. Se ha comprobado experimentalmente [27] que si esto ocurre el ancho de banda aumenta y aparece una mejora en las prestaciones. En la Figura 4.18 se representa la respuesta frecuencial normalizada del sistema compuesto por tramos de fibra conectorizados para los casos sin desalineamiento y con desalineamiento longitudinal.

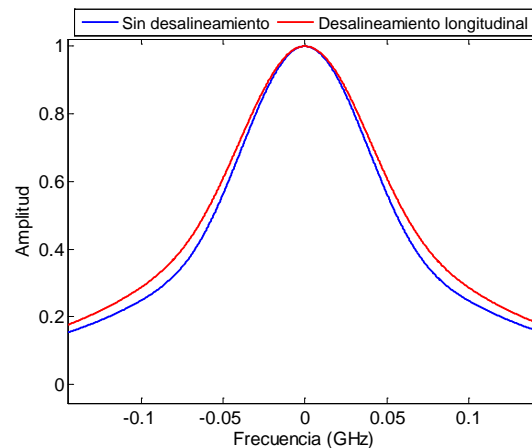


Figura 4.18.- Respuestas frecuenciales normalizadas del sistema POF con y sin desalineamiento.

Se puede observar que tal y como se ha explicado el ancho de banda en el caso en que el conector no tiene desalineamiento es menor que el caso en el que tiene desalineamiento longitudinal, es decir, se ha producido un aumento del ancho de banda del canal lo que provoca la mejora en las prestaciones mostrada en la Figura 4.17 (b).

Por último, la presencia de ambos tipos de desalineamiento hace que las prestaciones sean peores al caso de no haber desalineamiento, pero el empeoramiento producido es tan pequeño que ambos casos podrían considerarse iguales. Este, apenas perceptible, empeoramiento es el resultado de la combinación de los dos tipos de desalineamiento sobre la fibra; en la que se produce una compensación por parte del longitudinal de las pérdidas introducidas por el axial.

A tenor de los resultados mostrados en la Figura 4.17, se puede concluir que la peor situación en la que nos podríamos encontrar con este sistema de comunicaciones sería el caso de tener únicamente el desalineamiento axial ya que el empeoramiento producido en términos de BER es el mayor de los casos estudiados. De cualquier manera, la degradación de prestaciones originada por la existencia de desalineamientos en los conectores es reducida y puede considerarse que no es necesario tener un control preciso de esta variable al realizar la conectorización de los tramos de fibra presentes en un enlace POF. Este resultado es especialmente interesante para aplicaciones en las que existen multitud de conectores, como es el caso de los enlaces de fibra en los aviones, en los que además aparecen vibraciones que puede introducir pequeños desalineamientos de naturaleza aleatoria.

Capítulo 5: PRECODIFICACIÓN TOMLINSON-HARASHIMA

En el capítulo anterior se realizó un amplio estudio sobre ecualización que permitió comprobar que las prestaciones de un sistema de comunicaciones basado en fibra de plástico mejoran respecto a un sistema sin ecualización. En concreto, se comprobó que el ecualizador DFE es el más potente de los métodos de ecualización utilizados. El principal inconveniente de este método es la propagación de errores, es por eso que en este capítulo se pretende evaluar la técnica de precodificación Tomlinson-Harashima (THP).

En la sección 5.1 de este capítulo se explican las modificaciones introducidas sobre esta técnica para poder trabajar con un sistema modelado en tiempo continuo y así poder integrarla en el software OptSim. En la siguiente sección se describe el diseño del precodificador realizado en la herramienta de simulación, explicando cada una de sus partes. En la sección 5.3 se muestran los resultados obtenidos en varios experimentos y para terminar, en la sección 5.4 se explica un ejemplo de aplicación que incorpora esta técnica de transmisión y está basado en dispositivos desarrollados en la empresa KD-POF.

5.1.- THP para sistemas de comunicaciones modelados en tiempo continuo

Estudiando los antecedentes se comprobó que todas las referencias teóricas o aquellas en las que se aplicaba la técnica THP asumían un modelo discreto para el canal [16] [23] [28]. En este proyecto trabajamos con el software OptSim, que trabaja con modelos en tiempo continuo de la señal, lo que además permite tener un sistema cercano a los trabajos experimentales realizados.

Para la implementación de la técnica THP en sistemas modelados en tiempo continuo ha sido necesaria la introducción de una pequeña modificación sobre las ecuaciones que describen la técnica y que se han explicado en el Capítulo 2. En la Ecuación 5.1 se muestra la expresión de la señal discreta a la entrada del receptor, $r[k]$

$$r[k] = x[k] * h[k] + n[k] = \sum_{j=0}^P h[j] \cdot x[k-j] + n[k] \quad (5.1)$$

donde $x[k]$ es la señal codificada, $h[k]$ es la respuesta impulsional del canal con P muestras y $n[k]$ es el ruido, todos descritos de acuerdo a un modelo de señal discreto.

Si usamos un modelo de señal continuo en el que la secuencia de datos se codifica como una señal PAM caracterizada por un pulso conformador que denominamos $p(t)$, debemos sustituir las señales discretas por sus equivalentes en tiempo continuo y la convolución discreta por la convolución en tiempo continuo:

$$r(t) = x(t) * h(t) + n(t) = \sum_{k=0}^N x[k] \cdot p(t - kT) * h(t) + n(t) = \quad (5.2)$$

expresión en la que se ha expresado la señal $x(t)$ de acuerdo al modelo PAM siendo N el número de muestras de la señal discreta y T el periodo de símbolo. Operando sobre esta ecuación, llegamos a la siguiente expresión original de la técnica THP

$$\begin{aligned} &= \sum_{k=0}^N x[k] \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cdot p(t - \tau - kT) d\tau + n(t) = \sum_{k=0}^N x[k] \cdot g(t - kT) + n(t) = \quad (5.3) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cdot \sum_{k=0}^N x[t] \cdot p(t - \tau - kT) d\tau + n(t) \end{aligned}$$

donde se ha definido una función $g(t)$ que representa la respuesta impulsional equivalente del canal en caso de trabajo con modelos continuos de señal:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) \cdot p(t - \tau) d\tau \quad (5.4)$$

Esta respuesta impulsional equivalente no es más que la convolución de la respuesta impulsional del canal y el pulso conformador. De forma que se ha demostrado que la técnica THP es aplicable a sistemas modelados en tiempo continuo sin más que introducir esta modificación sobre la respuesta impulsional del canal a partir de la cual se realiza la codificación.

Las ecuaciones para la obtención de la respuesta impulsional equivalente del canal se implementan en el codificador situado en el extremo transmisor, tras obtener la estimación de la respuesta impulsional del canal, mediante la convolución con el pulso conformador específico del sistema. Esta operación debe realizarse de forma previa a la codificación y así se incluye en el bloque CCM de nombre *Codificador* mostrado en la Figura 5.1.

5.2.- Diseño del sistema THP

Como ya se ha explicado, el precodificador diseñado en este proyecto es aplicable a sistemas de comunicaciones modelados en tiempo continuo, como es el caso de los sistemas que evaluaremos con el software OptSim. A continuación se explican los diseños del codificador, del canal y del decodificador.

Como se explicó al final del Capítulo 3, el codificador y el decodificador están diseñados en Matlab gracias a la posible co-simulación entre las dos herramientas de simulación utilizadas en la elaboración de este proyecto. Las ecuaciones que los describen están basadas en el diagrama de bloques de la Figura 2.5.

En primer lugar se ha diseñado el sistema transmisor, cuyo principal bloque es el **codificador**, que recibe como entrada $a[k]$ que se corresponde con la secuencia binaria de salida del bloque PRBS modulada para tener las amplitudes acordes con la señal M-PAM. En cuanto al puerto de salida del bloque codificador, éste contiene la secuencia codificada, $x[k]$. A continuación, la señal

de salida del codificador pasa por un modulador NRZ que la transforma en una señal óptica para su posterior paso por el canal, tal y como muestra la Figura 5.1.

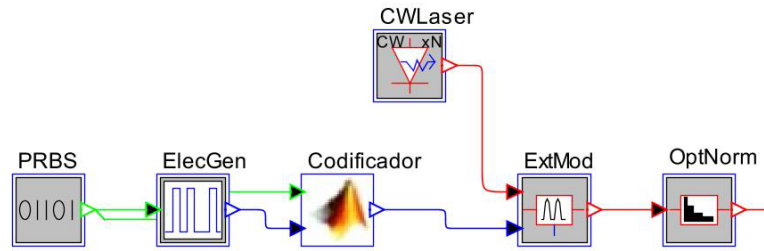


Figura 5.1.- Diagrama de bloques del transmisor.

Después del transmisor se ha implementado el **canal** formado por un enlace POF. El paso por el canal se realiza con el bloque *Optical Filter* de OptSim utilizado en las simulaciones realizadas en el capítulo anterior.

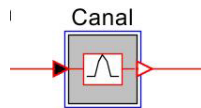


Figura 5.2.- Diagrama de bloques del canal.

Por último se ha diseñado el sistema receptor cuyo bloque principal es el **decodificador**. Éste realiza la operación módulo $2M$ inversa a la realizada en el codificador, el resultado de esta operación es una señal modulada que, en caso de que la técnica de precodificación se haya realizado correctamente debe ser una reconstrucción de la variable $a[k]$, como se muestra en la Figura 2.6. La parte de la decodificación está formada por dos bloques: el receptor que se encarga de convertir la señal óptica en eléctrica y el bloque CCM *Decodificador* que contiene las ecuaciones del método. Éste último tiene una entrada y una salida eléctrica correspondientes a la señal antes de decodificar y a la señal decodificada, respectivamente.

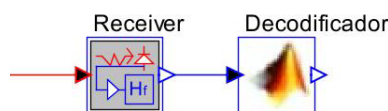


Figura.5.3.- Diagrama de bloques del receptor.

5.3.- Resultados

En esta sección se muestran los resultados obtenidos para distintos ejemplos de aplicación. En primer lugar se han hecho un conjunto de simulaciones para una tasa de transmisión de 1 Gb/s para varios valores de M . Por último, se ha estudiado el efecto del ruido y se han comparado las prestaciones entre el método de ecualización DFE y la precodificación THP.

5.3.1.- Variación del orden de la modulación M-PAM

Para comprobar el buen funcionamiento del proceso de decodificación del método THP en este apartado se recogen dos ejemplos de simulación en los que se ha modificado el orden de la modulación M-PAM. Los resultados se muestran en las Figuras 5.4 y 5.5. En ellas puede

observarse la decodificación realizada con las ecuaciones del método para una señal con tasa de transmisión de 1 Gb/s y un tramo de fibra de plástico de 50 metros.

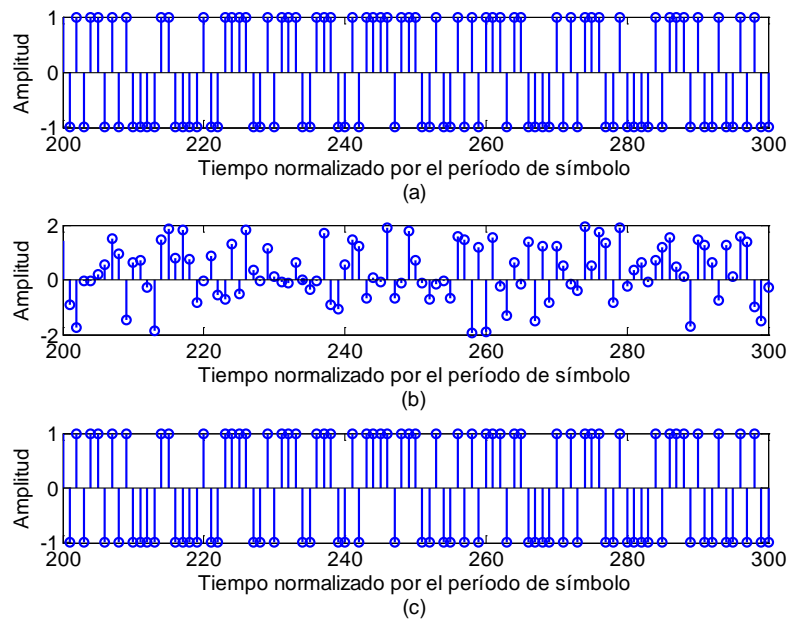


Figura 5.4.- Fragmento de las secuencias modulada (a) codificada (b) y decodificada (c) para una tasa de transmisión de 1 Gb/s y un valor de M igual a 2.

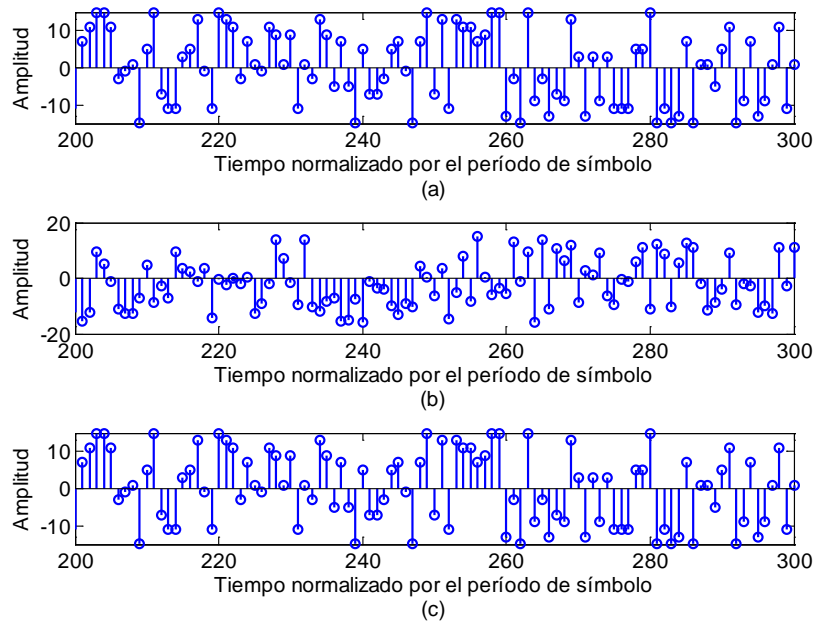


Figura 5.5.- Fragmento de las secuencias modulada (a) codificada (b) y decodificada (c) para una tasa de transmisión de 1 Gb/s y un valor de M igual a 16.

A la vista de las gráficas, se comprueba el correcto funcionamiento del método descrito en el apartado 2.2.3 del Capítulo 2. Este método ha permitido corregir los errores derivados de la presencia de ISI en el sistema.

A continuación, se muestra tanto el esquemático completo del THP, como un conjunto de señales en distintos puntos del esquemático para una modulación 4-PAM. La Figura 5.6 indica

cuáles son esos puntos de la cadena de transmisión, que comprenden tanto secuencias discretas como señales en tiempo continuo y la Figura 5.7 las señales en esos puntos.

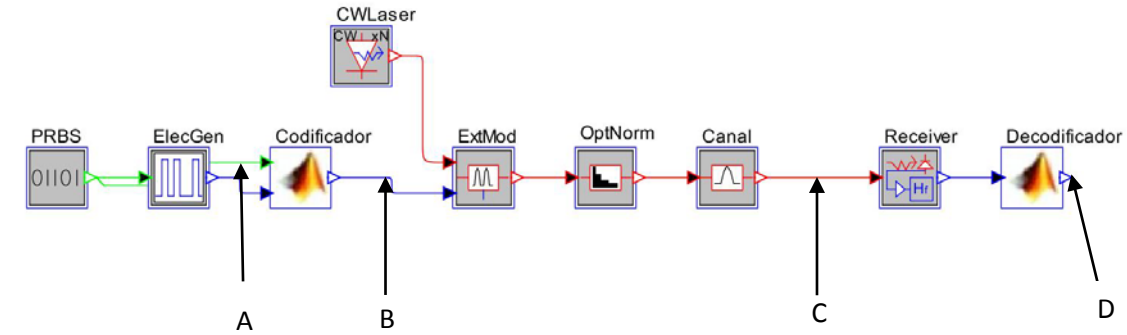


Figura 5.6.- Esquemático completo del sistema THP.

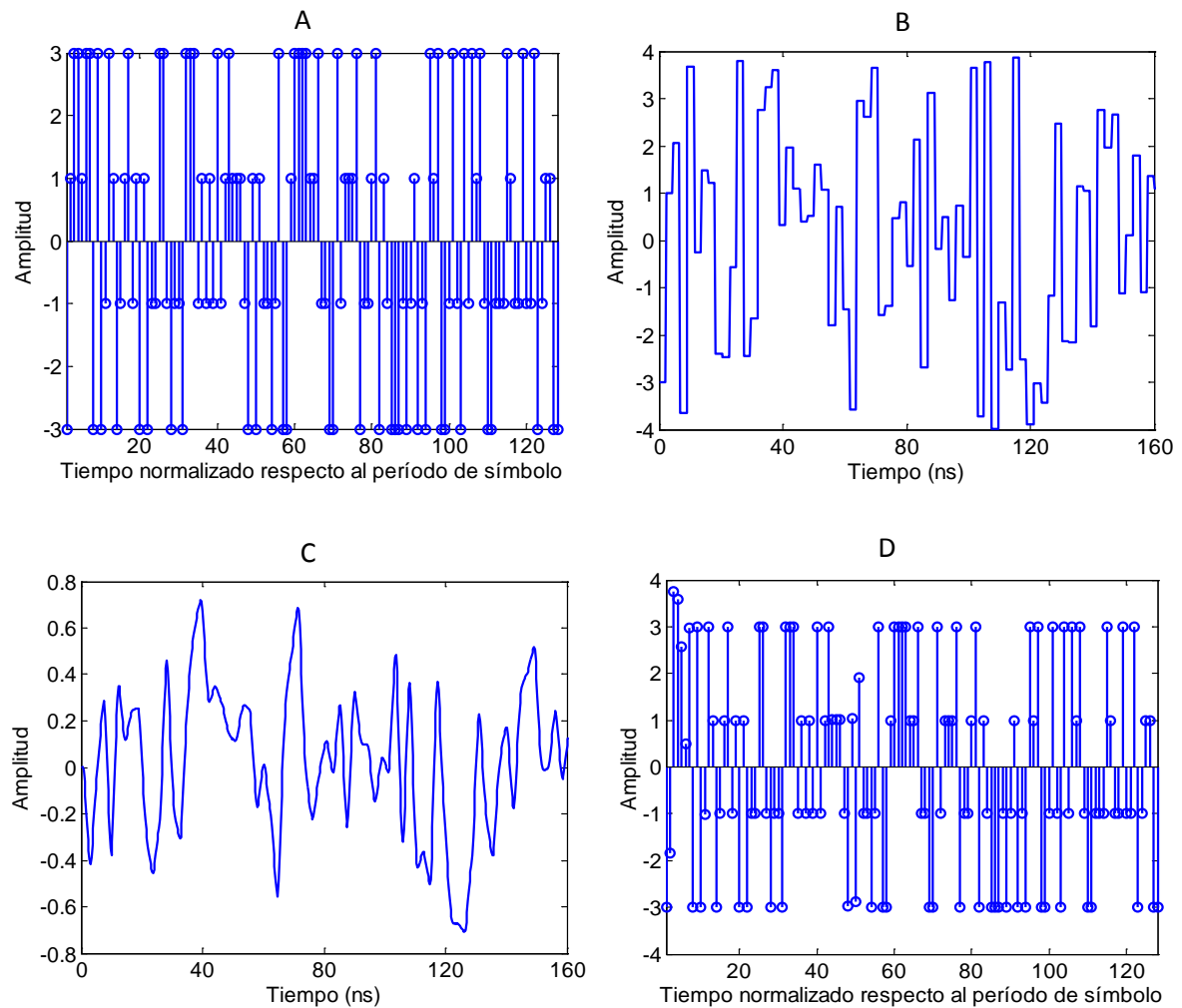


Figura 5.7.- Señales en los puntos del esquemático mostrado en la Figura 5.6. A: Secuencia modulada, B: señal decodificada, C: señal a la salida del canal y D: secuencia decodificada.

Como se puede apreciar, la señal decodificada (punto E) se corresponde con bastante fidelidad con la señal de amplitudes moduladas (punto B), de forma que se demuestra que la decodificación se realiza correctamente.

5.3.2.- Comparativa entre las tasas de error de los métodos THP y DFE

La bondad de la técnica de precodificación se ve afectada en gran medida por el ruido introducido en el receptor. Se ha comprobado que en presencia de ruido la decodificación no es tan buena como ocurría en los casos descritos anteriormente pero si permite obtener tasas de error aceptables en la comunicación. En la Figura 5.8 puede verse de cómo el ruido del receptor afecta a la decodificación obteniendo una tasa de error del orden de 10^{-6} .

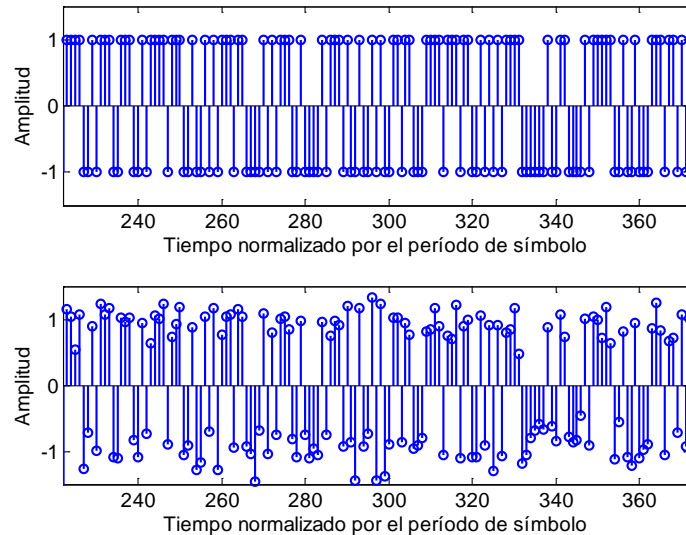


Figura 5.8.- Señal inicial y señal decodificada con ruido añadido.

A continuación se ha realizado una comparativa de prestaciones entre el DFE y el THP para ver de qué manera el ruido comentado afecta a la tasa de error y cuál de los dos métodos es más robusto frente a éste.

En primer lugar se realiza una inicialización de los parámetros del ecualizador DFE, para ello se simula el sistema sin presencia de ruido y con optimización MMSE en el DFE. Una vez simulado, hemos obtenido los coeficientes óptimos del ecualizador que deben ser introducidos como parámetros en el bloque utilizado. A continuación, al igual que se procedió en los resultados de ecualización mostrados en el capítulo anterior, se ha procedido a variar la potencia óptica de entrada al receptor, de forma que el ruido eléctrico introducido por éste afecta en mayor o menor medida a la señal a su salida. De esta forma se han podido comparar las prestaciones de ambos métodos obteniendo la tasa de error para tres longitudes de POF (10, 25 y 50 metros) en función de la potencia recibida y para una tasa de transmisión de 1 Gb/s. En la Figura 5.9 se muestran los resultados obtenidos. En las gráficas se puede ver como en ambos casos la degradación de las prestaciones es similar, en torno a 4.5 dB de potencia entre los distintos tramos de fibra. A raíz de los resultados obtenidos se puede concluir que el funcionamiento del método de ecualización con un DFE es mejor que el del método de precodificación ya que permite obtener valores de tasa de error de bit del mismo orden que los de la precodificación

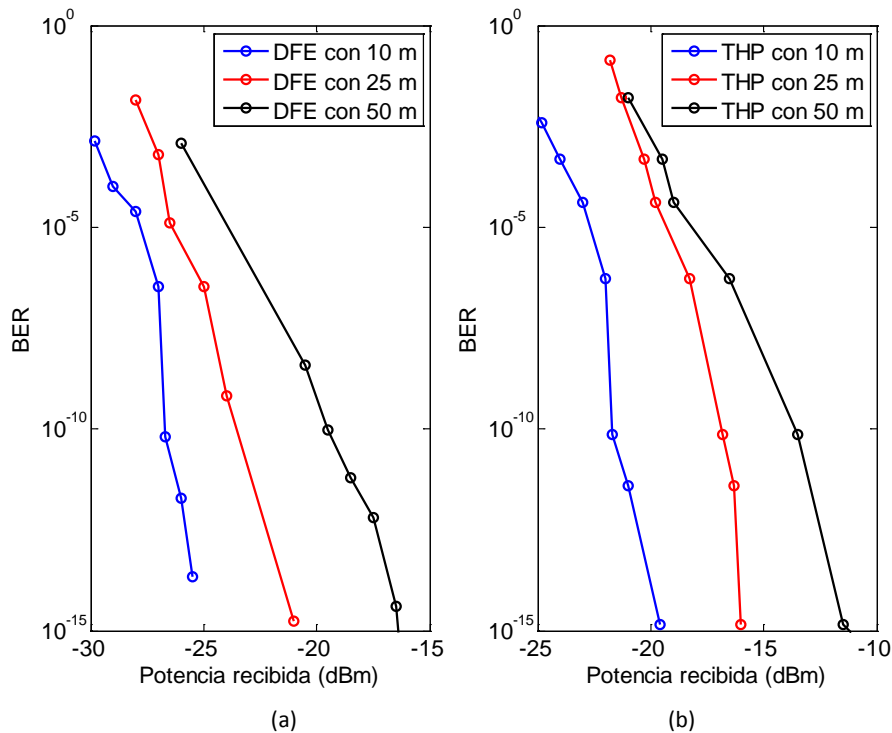


Figura 5.9.- Curvas de BER para los dos métodos estudiados. (a) DFE y (b) THP para 10, 25 y 50 metros y 1 Gb/s.

pero requiriendo valores inferiores de potencia (unos 5 dB menos). Sin embargo, no debemos olvidar la problemática de propagación de errores de la técnica DFE que no afecta a la precodificación THP. De esta forma, se puede afirmar que existe un compromiso entre las dos técnicas y que se deberá elegir la más adecuada en función de la previsión de la existencia de ráfagas de errores en la transmisión de la señal.

5.4.- Ejemplo de aplicación

Existen dispositivos comerciales para fibra de plástico que hacen uso de la técnica de precodificación Tomlinson-Harashima tratada en este capítulo. Es el caso de los transceptores de la empresa española KD-POF, dedicada al diseño y desarrollo de componentes para sistemas de comunicación mediante fibra óptica de plástico. KD-POF comercializa transceptores para tasas de transmisión de 100 Mb/s y 1 Gb/s que emplean la técnica THP además de códigos correctores de errores FEC [17]. En la Figura 5.10 se muestra el esquemático que permite evaluar las prestaciones de un enlace POF usando estos transceptores. En este esquema, el generador de tráfico es el encargado de generar la secuencia de datos a transmitir sobre el enlace POF y a la vez de comparar estos datos de origen con los recibidos para hacer una estimación de la tasa de error. Por otra parte, el kit de evaluación también incluye un módulo que permite monitorizar desde un PC el estado de cada uno de los transceptores (potencia recibida, margen de potencia, tasa de transmisión...). En el grupo de trabajo en el que se enmarca este proyecto se ha establecido una colaboración entre la empresa KD-POF y CUNY, gracias a la cual hemos podido disponer de un kit de evaluación de dicha empresa compuesto por dos transceptores y un módulo de monitorización desde PC.

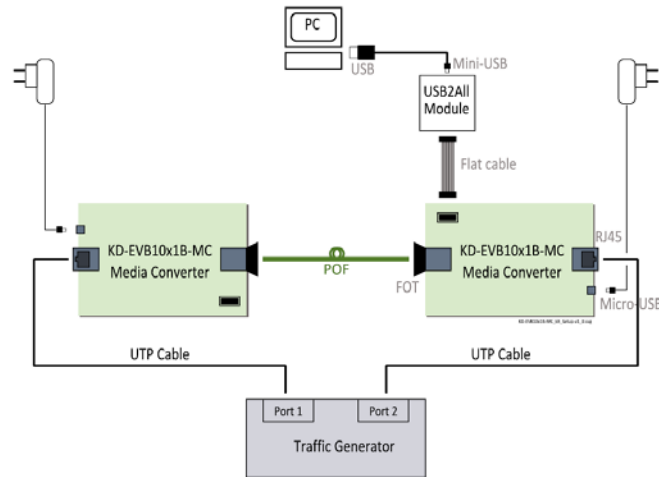


Figura 5.10.- Esquemático del montaje experimental.

En la Figura 5.11 se muestra una fotografía del montaje realizado en el laboratorio, a partir del cual hemos podido comprobar la capacidad de estos dispositivos de transmitir tasas de Gigabit Ethernet sin errores. Para el experimento, se han usado varios tramos de fibra de plástico de distintas características (salto de índice, índice gradual) y longitudes en torno a 50 metros.



Figura 5.11.- Montaje experimental.

En este caso, y como experimento preliminar, el tráfico transmitido por el enlace POF ha sido el generado por la propia red de comunicaciones de la Universidad. Así, hemos conectado el puerto de datos (conector RJ45) de uno de los transceptores a una roseta de red del laboratorio mediante un cable UTP y el puerto de datos del otro transceptor al PC mediante otro cable UTP. La comunicación entre los transceptores es en modo full-duplex, y debe realizarse mediante fibra POF dúplex o usando dos tramos de POF. Por tanto, los datos que se transmiten en uno de los sentidos de comunicación son los generados por la red y enviados al PC, mientras que los datos en el otro sentido de la comunicación son los generados por el PC y enviados a la red. Con esta configuración, hemos podido comprobar que es posible transmitir datos a tasas de 1 Gb/s para longitudes de 50 m de POF, y distintos niveles de señalización (hasta 16-PAM) siendo la potencia óptica recibida en todos los casos del orden de -16 dBm. Para longitudes mayores (75 m), la comunicación entre los transceptores no se puede establecer de forma exitosa. Presumiblemente, la causa de pérdida de la comunicación en estos casos se debe a la pérdida de potencia introducida por la fibra. Este hecho es especialmente notable en el caso de la fibra OM-GIGA de índice gradual, para la cual la comunicación a 1 Gb/s se puede establecer para 50

metros de enlace, pero no para 55 metros al ser el factor de atenuación para esta fibra mayor que el del resto de fibras disponibles.

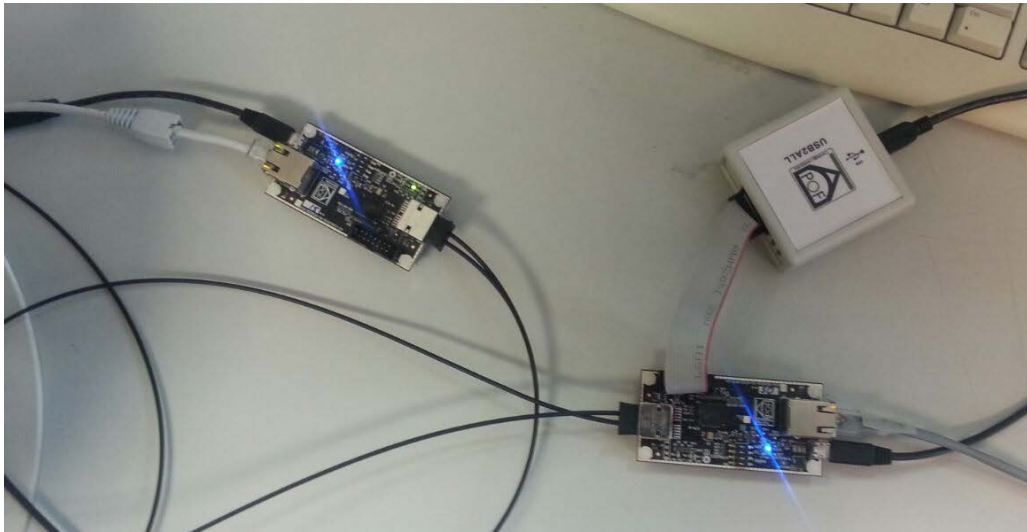


Figura 5.12.- Imagen de los transceptores utilizados.

El experimento completo para analizar las prestaciones de estos transceptores y evaluar su comportamiento en distintos escenarios, por ejemplo, distintas longitudes de fibra o distinto número de niveles en señalización multinivel M-PAM se realizará en los laboratorios de la CUNY, donde se dispone del generador y analizador de tráfico necesario para ello.

Capítulo 6: CONCLUSIONES

En este capítulo se exponen las conclusiones generales extraídas de la realización de este proyecto y sus posibilidades de continuación. Por último se ha hecho una valoración del trabajo realizado a partir de los objetivos marcados al principio del mismo.

6.1.- Conclusiones

En primer lugar, se ha integrado el modelo POF del grupo de trabajo en que se ha enmarcado este proyecto en el software de simulación de sistemas ópticos OptSim. Esta integración permite realizar simulaciones a nivel de sistema de distintos esquemas de sistemas POF mejorando la metodología de dos pasos seguida hasta la actualidad. La experiencia de OptSim en el desarrollo de bloques de comunicaciones ópticas como fuentes, moduladores o receptores y su continua actualización e inclusión de modelos comerciales hace que esta integración suponga una herramienta muy potente para el grupo de trabajo en fibra óptica de plástico.

Como segunda parte, se ha hecho uso de la integración del modelo para evaluar distintas técnicas de transmisión aplicadas a un enlace basado en fibra óptica de plástico. En particular, se ha evaluado la mejora de prestaciones que introducen las técnicas de ecualización digital en los sistemas basados en POF y también la aplicación de la técnica de precodificación Tomlinson-Harashima. A este respecto, se ha observado como con la ecualización es posible trabajar con tasas de transmisión mayores, superiores a 1 Gb/s, pudiendo llegarse incluso a tasas de 5 y 10 Gb/s con longitudes de fibra pequeñas, menores de 10 metros. Un efecto parecido se observa con la técnica THP, si bien ésta requiere que la potencia óptica recibida sea mayor.

A partir de los resultados obtenidos en el estudio de las técnicas de ecualización, se puede concluir que al trabajar con un ecualizador DFE se consiguen mejores prestaciones que con el FFE, dando lugar a tasas de errores menores y a la posibilidad de trabajar, como se ha dicho en el párrafo anterior, con una gama más amplia de tasas de transmisión. También se ha comprobado cómo influye el número de coeficientes que forman los ecualizadores en el resultado final, se ha obtenido que a partir del valor óptimo un aumento del número de coeficientes no supone ninguna mejora en las prestaciones sino que puede llegar a empeorarlas, además del coste de implementación adicional. También se ha estudiado el efecto que tienen las técnicas de corrección de errores, comprobando cómo a partir de un cierto valor de BER, 10^{-3} aproximadamente, las prestaciones mejoran en varios órdenes de magnitud. Así mismo, también se ha estudiado el efecto de los conectores en el sistema. Se ha observado cómo al aumentar su número el sistema se iba degradando aunque se han obtenido valores de BER aceptables hasta tasas de 500 Mb/s con ecualización DFE y hasta 300 Mb/s sin ecualización, valores que pueden ser mejorados con códigos de corrección de errores comentados anteriormente. Respecto a los conectores, también se ha realizado un estudio de la degradación introducida por posibles desalineamientos. Se ha concluido que el desalineamiento axial es más perjudicial que el longitudinal ya que introduce mayores pérdidas. Por el contrario, si sólo hay

desalineamiento longitudinal se ha visto que se producen mejoras en las tasas de error debidas al aumento del ancho de banda del sistema por el filtrado espacial de modos en el receptor.

Respecto al precodificador de Tomlinson-Harashima, durante el diseño del precodificador se ha comprobado que la realización en tiempo continuo del sistema requiere de la incorporación de un pulso conformador para modelar la respuesta del sistema POF. Los diversos estudios realizados han permitido comprobar cómo el sistema es capaz de decodificar una secuencia de bits para distintos órdenes de una modulación M-PAM. También se han estudiado las prestaciones de la técnica THP frente a las de DFE, para ello se ha realizado un estudio de las prestaciones para tramos de fibra de plástico de distintas longitudes. Los resultados obtenidos muestran que la degradación de prestaciones al aumentar la longitud de la fibra es similar para ambos métodos pero el DFE es mejor ya que requiere aproximadamente 5 dB menos de potencia que el THP, aunque en situaciones con propagación de errores el THP es más robusto.

6.2.- Posibilidades de continuación

El estudio realizado puede llevarse a cabo para cualquier otro tipo de fibra con facilidad ya que el diseño de los distintos esquemáticos es independiente de los elementos utilizados en la generación del canal, los cambios que deberían introducirse estarían centrados en el documento de texto que contiene la configuración. Otra posibilidad sería seguir trabajando con el mismo tipo de fibra en el estudio de otras técnicas de transmisión como podrían ser la señalización multinivel, CAP y DMT, descritas en el Capítulo 2. Así mismo, podría ser interesante evaluar las prestaciones de enlaces POF con técnicas de señalización multinivel M-PAM, con y sin ecualización.

También podría ser interesante continuar con el diseño realizado en bloques individualizados para cada elemento caracterizado por el subgrupo POF del GTF incorporándolos a librerías ya existentes o creando librerías específicas para ellos y ser utilizados posteriormente a nivel académico o en investigaciones de otras técnicas del grupo.

Una de las conclusiones obtenidas es la importante mejora producida al introducir la ecualización en un sistema, por ello podrían llevarse a cabo estudios sobre otras técnicas de ecualización. Respecto al precodificador de Tomlinson-Harashima, podrían estudiarse variantes que permitan reducir los niveles de potencia requeridos en el receptor para intentar obtener los valores logrados con el DFE. Por último, sería interesante estudiar el uso conjunto del THP con métodos que permitan obtener mejores tasa de error en la decodificación, uno de ellos podría ser el FFE que ayudaría a optimizar la decodificación realizada por el THP.

6.3.- Valoración del proyecto

De acuerdo con los objetivos marcados al principio del proyecto, se ha llevado a cabo el estudio de ecualización para un amplio rango de longitudes y tasas de transmisión y se han podido sacar conclusiones acerca de la mejora que supone utilizar un ecualizador frente al trabajo sin él; también se han estudiado como afectan al resultado final del sistema dos tipos de ecualizadores y el coste de implementación de cada uno de ellos en función de su número de coeficientes.

A partir de los resultados de ecualización, también se han podido realizar estudios no previstos inicialmente, como los del ancho de banda y de la variación de la atenuación de las respuestas frecuenciales de los sistemas POF utilizados que han ayudado a la interpretación de los resultados obtenidos. También de forma adicional se ha evaluado el efecto de los conectores sobre las prestaciones del sistema por su interés en escenarios de aplicación de la POF como las redes en aviones.

Por otra parte se ha implementado la técnica de codificación Tomlinson-Harashima, se han comparado sus prestaciones con el método DFE obteniendo resultados que abren otras vías de investigación comentadas en la sección anterior. Por último también se ha podido trabajar con un dispositivo electrónico que me ha permitido ver experimentalmente el funcionamiento del método.

A nivel personal me ha permitido conocer un nuevo campo de investigación dentro de las comunicaciones ópticas que no había estudiado en detalle en la carrera. También he conocido nuevas herramientas de simulación y distintas técnicas de transmisión con sus múltiples aplicaciones, algunas de ellas tan cotidianas como las redes desarrolladas en los hogares y en los automóviles. Por todo lo anterior, mi valoración sobre este proyecto puede considerarse positiva y muy satisfactoria.

Bibliografía

- [1] A. López, M.A. Losada, J. Mateo, "Polymer Optical Fibers, POF", en el libro *Optical Communication and Related Microwave Techniques*, John Wiley & Sons (2015).
- [2] Paul Polishuk, "Plastic Optical Fibers Branch Out", *IEEE Communications Magazine*, 140-148 (2006).
- [3] G. Jiang, R. F. Shi, A. F. Garito, "Mode coupling and equilibrium more distribution conditions in plastic optical fibers," *IEEE Photonics Technology Letters*. 9(8), 1128-1130 (1997).
- [4] J. Mateo, M.A. Losada, J. Zubia, "Frequency response in step index plastic optical fibers obtained from the generalized power flow equation", *Optics Express* 17(4), 2850-2860 (2009)
- [5] Especificaciones de la fibra Fontex: http://www.lucina.jp/eg_fontex/
- [6] Plastic Optical Fiber Trade Organization (POFTO): "Present State-of-the-art of Plastic Optical Fiber (POF) Components and Systems", *The TIA TR-42 Engineering Committee on User Premises Telecommunications Infrastructure* (2004).
- [7] MOST Cooperation, "Appendix D: Frame Structure and Boundary (Informative)", *MOST Specification Rev. 3.0 E2*, 211-215 (2010).
- [8] M.A. Losada, J. Mateo, A. López, N. Antoniadis, D. Richards, "Challenges in the Integration of Plastic Optical Fibre Technology in Aircrafts", in *Proceedings of the 14th International Conference on Transparent Optical Networks*, Coventry, Reino Unido (2012).
- [9] J. Mateo, M. A. Losada, A. López, "Application of the plastic optical fibre in domestic multimedia networks", in *Proceedings of the 3rd International Conference on Transparent Optical Networks (Mediterranean Winter)*, Angers, France (2009).
- [10] D. H. Richards, M. A. Losada, N. Antoniadis, A. López, J. Mateo, X. Jiang, N. Madamopoulos, "Modeling Methodology for Engineering SI-POF and Connectors in an Avionics System", *Journal of Lightwave Technology*, 31(3), 468-475 (2013).
- [11] F. Breyer, N. Hanik, S. Randel, B. Spinnler, "Investigation on Electronic Equalization for Step-Index Polymer Optical Fiber Systems", in *Proceedings of the IEEE/LEOS Benelux Symposium*, Eindhoven, Países Bajos (2006).
- [12] D. Zeolla, A. Antonino, G. Bosco, R. Gaudino, "DFE Versus MLSE Electronic Equalization for Gigabit/s SI-POF Transmission Systems", *IEEE Photonics Technology Letters*, 23(8), 510-512 (2011).
- [13] A. Nespola, S. Straullu, P. Savio, D. Zeolla, J. C. Ramírez Molina, S. Abrate, R. Gaudino, "A New Physical Layer Capable of Record Gigabit Transmission Over 1 mm Step Index Polymer Optical Fiber", *Journal of Lightwave Technology*, 28(20), 2944-2950 (2010).

- [14] S. Loquai, R. Kruglov, B. Schmauss, C. A. Bunge, F. Winkler, O. Ziemann, E. Hartl, T. Kupfer, "Comparison of Modulation Schemes for 10.7 Gb/s Transmission Over Large-Core 1 mm PMMA Polymer Optical Fiber", *Journal of Lightwave Technology*, 31(13), 2170-2176 (2013).
- [15] Yixuan Voigt, "Digital Pre- and Post Equalizers for In-Car Data Transmission over Plastic Optical Fibers", Tesis doctoral, Universidad de Stuttgart (2014).
- [16] Y. Wang, J. Müller, J. Speidel. "3Gbit/s Transmission over Plastic Optical Fiber with Adaptative Tomlinson-Harashima Precoded Systems", in *Proceedings of IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 629-632 (2013).
- [17] Página web de la empresa KD-POF: <http://www.kdpof.com/>
- [18] S. Loquai, R. Kruglov, B. Schmauss, C. A. Bunge, F. Winkler, O. Ziemann, E. Hartl, T. Kupfer, "Comparison of Modulation Schemes for 10.7 Gb/s Transmission Over Large-Core 1 mm PMMA Polymer Optical Fiber", *Journal of Lightwave Technology*, 31(13), 2170-2176 (2013).
- [19] S. Loquai, R. Kruglov, C. A. Bunge, O. Ziemann, B. Schmauss, J. Vinogradov, "10.7-Gb/s Discrete Multitone Transmission Over 25-m Bend-Insensitive Multicore Polymer Optical Fiber", *IEEE Photonics Technology Letters*, 22(21), 1604-1606 (2010).
- [20] G. H. Im, D. D. Harman, G. Huang, A. V. Mandzik, M. H. Nguyen, J. J. Werner, "51.84 Mb/s 16-CAP ATM LAN standard", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13(4), 620-632 (1995).
- [21] M. Wieckowski, J. B. Jensen, I. Tafur Monroy, J. Siuzdak, J. P. Turkiewicz, "300 Mbps Transmission with 4.6 bit/s/Hz Spectral Efficiency over 50 m PMMA POF Link Using RC-LED and Multi-Level Carrierless Amplitude Phase Modulation", in *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference*, Los Angeles, USA (2011).
- [22] J. L. Wei, L. Geng, D. G. Cunningham, R. V. Penty, I. H. White, "Gigabit NRZ, CAP and optical OFDM systems over POF links using LEDs", *Optics Express*, 20(20), 22284-22289 (2012).
- [23] Robert F. H. Fischer, "Precoding and Signal Shaping for Digital Transmission", *John Wiley & Sons, Inc.*, New York (2002).
- [24] Knowledge Development for POF, "Código de corrección de errores adaptativo para comunicaciones de datos a través de una fibra óptica de plástico", Patente ES-2489740 (2014).
- [25] D. H. Richards, "Chapter 5. Commercial Optical Communication Software Simulation Tools", *Springer* (2012).
- [26] RSoft Design Group, Inc., "OptSim Models Reference. Volume II Block Mode", Manual de usuario (2008).
- [27] P. Heredia, J. Mateo, M.A. Losada, "Transmission capabilities of large core GI-POF based on BER measurements", in *Proceedings of the 16th International Conference on POF*, Torino, Italia (2007).
- [28] L. Caballero, "Tomlinson Harashima Precoding for Multi-Gigabit short-haul Transmission over Plastic Optical Fibers", Tesis de Máster, Universidad de Stuttgart (2010).